

Российская академия наук  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ  
им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПМех РАН)

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва, 119526  
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31  
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735  
ИНН/КПП 7729138338/772901001

“Утверждаю”

Зам. директора ИПМех РАН  
чл.-корр. РАН, проф. С.Т.Суржиков



05.02.2014 № 11504/02-21412-78

На № \_\_\_\_\_

### ОТЗЫВ

ведущей организации ИПМех РАН на диссертацию Брыкиной Ирины Григорьевны «Методы расчета теплопередачи и трения при пространственном гиперзвуковом ламинарном обтекании тел во всем диапазоне чисел Рейнольдса», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

**Актуальность темы.** Проблема нагрева поверхности космических аппаратов при их спуске в атмосфере Земли связана со сменой режимов течения в пристеночной области от свободномолекулярного до континуального, проходя промежуточный переходный. Континуальный, или режим сплошной среды, описывается соответствующими математическими моделями от полных уравнений Навье – Стокса до уравнений пограничного и ударного слоев. Для исследования структуры поля течения около тела и поведения его аэродинамических характеристик в зависимости от определяющих параметров задачи характерно широкое использование численных методов при том, что не снижается роль приближенных аналитических методов.

При проектировании перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов возникает необходимость в исследовании зависимостей аэродинамических и тепловых характеристик от целого ряда параметров: высоты, скорости полета, углов атаки и скольжения, геометрии формы тела и т.д., что требует проведения многочисленных расчетов. Ввиду этого, разработка эффективных аналитических и приближенных методов, позволяющих значительно сократить вычислительные затраты в сравнении с применением более полных постановок, в настоящее время остается актуальной.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.** Диссертация содержит практически важные результаты, основанные на полученных аналитических решениях, для обоснования достоверности которых в работе приводятся их сопоставление с известными численными решениями и экспериментальными данными, а на основании проведенного сравнения определена область их применимости и проведена оценка точности. Дано обоснование используемых в диссертации методов последовательных приближений и подобия тестированием в рамках различных моделей ударного слоя как для совершенного газа, так и химически реагирующего. Обоснованность использования континуального решения для переходного режима обтекания показана сравнением с решениями кинетического уравнения Больцмана.

Рассмотренные задачи в диссертации являются фундаментальными в теории течений вязкого газа, исследование их свойств важно для практических приложений.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех частей, заключения и списка литературы из 248 наименований.

Обзор литературы представлен во введении, там же сформулированы цели, обоснованы актуальность темы, ее научная и практическая значимость, перечислены новые результаты и положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание частей.

Первая часть посвящена аналитическому исследованию пространственных течений при больших числах Рейнольдса в рамках приближения ламинарного пограничного слоя. Рассматриваются обтекания стреловидных крыльев большого размаха под углами атаки, осесимметричных и трехмерных тел с не- и проницаемыми поверхностями. Для нахождения аналитических решений для трения и теплового потока и профилей компонент скорости и энтальпии использован метод последовательных приближений. Получены зависимости от угла скольжения, температуры поверхности, числа Прандтля и параметров внешнего невязкого потока для случаев течений несжимаемой жидкости и сжимаемого газа. В случае течения химически реагирующего газа для нормированного (на значение в критической точке) теплового потока установлена его слабая зависимость от степени диссоциации в рамках модели тонкого ударного слоя и предложены приближенные формулы для теплового потока к идеально каталитической поверхности затупленных тел.

Во второй части представлены результаты расчетов гиперзвуковых течений около затупленных тел при умеренно больших и умеренно малых числах Рейнольдса в рамках модели вязкого ударного слоя. Метод последовательных приближений развит для модели тонкого вязкого ударного слоя. Предложен итерационный алгоритм нахождения решения, при этом заданные граничные условия удовлетворяются введением специальных управляющих функций. Метод решения обобщен для общего случая трехмерного течения в ударном слое. Аналитическое решение получено для коэффициентов трения и теплопередачи, компонент скорости и энтальпии, давления и отхода ударной волны.

Установлена зависимость решения для относительного теплового потока при  $Re > 50$  от параметров геометрии тела, температурного фактора  $T_w$ , числа Прандтля  $Pr$  и для крыльев от угла скольжения  $\phi$ . Найдено, что для холодной поверхности эта зависимость определяется в основном геометрическими параметрами, а от  $Pr$ ,  $\phi$ ,  $T_w$  весьма слабая. Так, в плоскости симметрии трехмерного тела – зависимость от средней кривизны поверхности, угла  $\alpha$  между

внешней скоростью и касательной к линии растекания потока, и кривизной этой линии. Для боковой поверхности – выражения в виде интегралов вдоль меридиональных сечений тела.

Для обтекания трехмерного затупленного тела выявлен параметр подобия числа Стантона в точке торможения этого и осесимметричного тела, зависящий от отношения главных кривизн поверхности и числа  $Re$ . Исследовано влияние продольных градиентов давления и эффектов скольжения на величины теплового потока и трения.

Представлены результаты тестирования аналитического метода для задач гиперзвукового обтекания пространственных тел и крыльев сравнением аналитических решений с численными результатами, полученными в рамках различных моделей от пограничного и тонкого ударного слоев до полных уравнений Навье–Стокса, и оценена область их применимости. Сопоставлением зависимостей характеристик трения и теплопередачи от числа  $Re$ , углов атаки и скольжения показано их удовлетворительное согласование.

Для задачи трехмерного обтекания затупленного тела многокомпонентным газом в рамках модели тонкого ударного слоя с граничными условиями на поверхности с учетом рекомбинации атомов, скольжения и скачка температуры найденные распределения относительного теплового потока в зависимости от геометрических параметров тела сопоставлялись с численными результатами для тел различной формы и угла атаки до  $45^\circ$ . Установлено, что различные модели воздуха (замороженные, неравновесные и околоравновесные реакции) для идеально каталитической поверхности дают близкие результаты, и в основном определяются геометрическими параметрами тела.

Несомненный интерес представляют результаты третьей части, в которой разработан метод подобия трехмерных и осесимметричных течений для исследования характеристик трения и теплопередачи на пространственных телах, обтекаемых под углом атаки. Рассмотрены режимы течения от разреженного до погранслоного.



Для расчета теплового потока выявлены два параметра подобия: угол  $\theta$  между нормалью к поверхности и направлением скорости набегающего потока, и  $Re/H$ , где  $H$  – средняя кривизна поверхности, связанные с геометрией тела. Для определения теплового потока и трения на всей боковой поверхности пространственного тела методом подобия решаются двумерные уравнения для выбранной вязкой модели течения на определяемом осесимметричном теле с теми же двумя параметрами. Дается сравнение результатов, полученных методом подобия на 2D теле, с решениями на 3D теле для окрестности плоскости симметрии и боковой поверхности. Проведенный сравнительный анализ численных решений показал, что для течения в окрестности плоскости симметрии необходимо учитывать поперечную кривизну во втором параметре, влияние которой на точность результатов достаточно велико.

Проведено тестирование метода подобия для различных моделей вязких течений: от тонкого вязкого ударного слоя (ТВУС), вязкого ударного слоя (ВУС) до полных уравнений Навье-Стокса, сравнением результатов с численными решениями трехмерных уравнений для одной и той же модели течения и того же вязкого газа. В качестве газа рассматривался совершенный газ и химически реагирующий с неравновесными реакциями и многокомпонентной диффузией. В расчетах предполагалось, что трехмерные тела обтекались газом под углом атаки от 0 до 45°. Тестирование показало, что точность результатов падает с увеличением расстояния от точки торможения. В целом метод позволяет вычислять тепловые потоки и трение с хорошей точностью независимо от модели газа как для однородного, так и химически реагирующего для разных каталитических свойств поверхности. Отмечаются преимущества представленного метода подобия от метода осесимметричной аналогии пограничного слоя.

В четвертой части представлены разработанные континуальные методы исследования обтекания затупленных тел гиперзвуковым потоком разреженного газа при малых числах Рейнольдса в переходном режиме. Приводится асимптотический анализ уравнений Навье-Стокса для гиперзвукового вязко-

го ударного слоя около затупленного тела при малых  $Re$  для вывода моделей течений ТВУС и ВУС. Получены асимптотически согласованные граничные условия на ударной волне и поверхности тела, в частности, для модели ВУС модифицированное граничное условие для скачка температуры.

Так, предложенная в диссертации асимптотически согласованная модель ВУС отличается от модели Дэвиса граничными условиями на ударной волне и на поверхности, что расширяет область ее применимости в сторону меньших чисел  $Re$ . В результате улучшается точность определенных коэффициентов трения и теплопередачи. Асимптотическим методом найдены аналитические решения уравнений ТВУС для коэффициентов трения и теплопередачи, давления в зависимости от геометрических параметров и  $Re$ ,  $Pr$ ,  $\epsilon$ ,  $\omega$ ,  $T_w$ , где  $\epsilon = (\gamma - 1)/2\gamma$ ,  $\gamma$  - отношение удельных теплоемкостей, коэффициент вязкости  $\mu \sim T^\omega$ . Даются выражения этих коэффициентов для течений: в окрестности точки торможения 3D тела, на 2D телах, на затупленных крыльях большого удлинения, в плоскости симметрии и на боковой поверхности 3D тела.

Тестирование полученных решений для переходного режима от континуального к свободномолекулярному проведено сравнением с численными решениями уравнений ТВУС, результатами прямого статистического моделирования Монте-Карло, экспериментальными данными и известными решениями для свободномолекулярного режима.

Сопоставлением асимптотических и численных решений в рамках асимптотически согласованных моделей ВУС и ТВУС для широкого диапазона числа Кнудсена  $Kn$  с результатами общеизвестных методов найдена оценка границы применимости континуального подхода для моделирования гиперзвукового обтекания тел разреженным газом. Установлено, что согласованные модели ВУС и ТВУС позволяют достаточно точно вычислять коэффициенты трения и теплопередачи на лобовой поверхности затупленных тел во всем переходном режиме обтекания.

В заключении сформулированы результаты.

**Замечания и выводы по диссертации.** Необходимо отметить, что рассмотренные в диссертации задачи сложны и многочисленны, а примененные аналитические методы их решения достаточно эффективны для достижения конечной цели исследования. В целом, в диссертации установлены новые фундаментальные свойства пространственных гиперзвуковых течений вязкого газа.

Основные результаты диссертации являются новыми, они полностью отражены в публикациях автора, опубликованы в 53 научных статьях, включая 34 публикации из списка ВАК РФ, доложены более чем на 35 международных и российских конференциях.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Замечаний по стилю и оформлению диссертации нет. В целом изложение полученных результатов в диссертационной работе проведено четко и последовательно. Вместе с тем следует сделать ряд замечаний.

1. В названии следовало бы вместо «во всем диапазоне чисел Рейнольдса» сформулировать «в широком диапазоне...», а в диссертации указать его числовые границы, как и для чисел  $Kn$ .

2. Не указано, какое из используемых начальных приближений для характеристик течения и теплообмена наилучшее для практической реализации аналитических методов.

Указанные выше замечания не снижают научной значимости результатов, полученных И.Г. Брыкиной в диссертации.

В целом диссертационная работа является законченным научным исследованием, содержит новые научные результаты, позволяющие его квалифицировать как значительное научное достижение, имеющее важное практическое значение.

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в ВПК «НПО Машиностроения», ЦНИИмаш, ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН и других организациях, занимающихся вопросами аэродинамики и теплообмена гиперзвуковых летательных аппаратов.

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а Брыкина Ирина Григорьевна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа обсуждалась и получила одобрение на расширенном заседании семинара лаборатории радиационной газовой динамики с участием сотрудников лаборатории физической газовой динамики и лаборатории взаимодействия плазмы и излучения с материалами 5 февраля 2014 г.

Зав. лабораторией  
взаимодействия плазмы и  
излучения с материалами,  
доктор физ.-мат. наук



А.Ф. Колесников

Ведущий научный сотрудник  
лаборатории физической газовой динамики,  
доктор физ.-мат. наук, профессор

В.А. Алексин

