

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу 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. Проблемы расчета теплопередачи и сопротивления пространственных тел являются одними из наиболее важных и актуальных задач гиперзвуковой аэротермодинамики, связанных с разработками современных высокоскоростных летательных аппаратов, движущихся в верхних слоях атмосферы. Создание приближенных аналитических методов позволяет исследовать зависимости аэродинамических и тепловых характеристик от высоты и скорости полета, угла атаки, геометрических параметров тела с минимальной затратой вычислительных ресурсов. Такие методы полезны для постановки экспериментов, интерпретации результатов численного моделирования и проведения многочисленных расчетов в процессе оптимизации формы новых гиперзвуковых летательных аппаратов, когда варьируются параметры обтекания и геометрия тела. Предметом диссертации И.Г. Брыкиной и является разработка таких эффективных приближенных методов решения пространственных задач гиперзвуковой аэротермодинамики.

В диссертационной работе приближенные методы расчета теплопередачи и напряжения трения на лобовой поверхности пространственных тел разработаны для трех режимов гиперзвукового обтекания, соответствующих разным участкам траектории спуска космических аппаратов. Первый – это режим ламинарного пограничного слоя, второй – «навье-стоксовский» режим, когда для описания течения используются полные или упрощенные уравнения Навье–Стокса, и третий – это режим, переходный от течения сплошной среды к свободномолекулярному обтеканию. Каждый из них характеризуется своим диапазоном изменения числа Рейнольдса (Re) и описывается соответствующими ему математическими моделями.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Во введении и соответствующих разделах диссертации дается обоснование используемых в работе математических моделей при больших и умеренных числах Re . Кроме того, путем асимптотического анализа уравнений Навье–Стокса, общих соотношений на разрывах и условий скольжения и скачка температуры на теле выведены асимптотически согласованные модели тонкого и полного вязкого ударного слоя. Обоснованность применимости этих моделей для расчета теплопередачи и трения в переходном режиме обтекания подтверждена сравнениями с решениями, полученными методом прямого статистического моделирования Монте-Карло и решениями кинетических уравнений. Проведено исследование сходимости развитого автором метода последовательных приближений и точности первого приближения,

используемого для получения аналитических решений. Оценены области применимости аналитических решений. В целом положения, выводы и рекомендации диссертации в достаточной степени обоснованы.

Достоверность и новизна. К числу новых результатов в аэротермодинамике, полученных автором, можно отнести следующие:

1. Получены приближенные аналитические решения трехмерных уравнений ламинарного пограничного слоя при наличии вдува или отсоса сжимаемого газа:

- с поверхности затупленных стреловидных крыльев большого удлинения обтекаемых под углом атаки при больших числах Re .

- в плоскости симметрии и боковой поверхности пространственных тел.

2. Получены приближенные аналитические решения трехмерных уравнений пограничного слоя в несжимаемой жидкости в зависимости от параметров внешнего невязкого течения. При их выводе был применен интегральный метод последовательных приближений, предложенный ранее Г.А. Тирским для двумерных задач пограничного слоя и обобщенный автором диссертации на пространственный случай.

3. Разработан метод последовательных приближений для решения уравнений тонкого (гиперзвукового) вязкого ударного слоя (ТВУС). Этим методом получены приближенные аналитические решения пространственных уравнений ТВУС в задачах обтекания при умеренных числах Re затупленных тел в зависимости от параметров набегающего потока, геометрических параметров и температуры поверхности тела.

4. Из результатов, справедливых при больших и умеренных числах Re , наиболее интересными и значимыми (в силу их простоты и хорошей точности) являются выражения для приведенных величин теплового потока и напряжения трения, отнесенных к их значениям в точке торможения. Подобный результат был получен ранее в рамках теории пограничного слоя Лизом (Lees L), причем только для осесимметричного тела и при ряде предположений: число Прандтля $Pr = 1$, температурный фактор $T_w = 0$ и др. Результаты автора диссертации хорошо согласуются с численными решениями уравнений ТВУС и уравнений Навье–Стокса в широком диапазоне параметров обтекания.

5. Для течений многокомпонентного, химически реагирующего газа показано, что распределение относительного теплового потока по идеально-каталитической поверхности пространственных затупленных тел слабо зависит от характера протекания химических реакций в ударном слое и хорошо описывается формулами, полученными автором. На основе аналитических решений, полученных в диссертационной работе, задача определения теплового потока на идеально-каталитической поверхности пространственного тела сведена к определению теплового потока в точке торможения осесимметричного тела.

6. Разработан метод подобия для расчета теплопередачи и трения на наветренной стороне пространственных тел, обтекаемых под углом атаки. Этот метод сводит решение трехмерной задачи обтекания к двумерной. Найдены

параметры подобия, позволяющие свести задачу определения теплового потока и напряжения трения на пространственном теле к задаче их определения на эквивалентных осесимметричных телах. Эквивалентные тела строятся специальным образом для меридиональных сечений исходного тела. При этом в двумерных уравнениях число Re умножается на локальный масштабирующий множитель, являющийся отношением значений средних кривизн пространственного и осесимметричного тел в рассматриваемой точке.

7. Создана конвертирующая программа, которая для заданной геометрии тела, угла атаки и угла меридиональной плоскости вычисляет все параметры эквивалентного осесимметричного тела. Конвертирующая программа может использоваться совместно с программами расчета двумерных уравнений в рамках разных моделей вязких течений, поскольку форма эквивалентных тел и масштабирующий множитель зависят только от геометрии реального тела и угла атаки.

8. На основании многочисленных тестовых расчетов, проведенных в рамках уравнений Навье–Стокса, полного и тонкого вязкого ударного слоя, показано что метод подобия обладает хорошей точностью, как для течений однородного газа, так и для химически неравновесных течений с учетом каталитических свойств поверхности. Этот метод позволяет рассчитывать теплопередачу и трение на лобовой поверхности трехмерных тел, обтекаемых гиперзвуковым потоком газа с учетом его реальных физико-химических свойств, используя программы расчета осесимметричных течений.

9. Асимптотическим методом получены аналитические решения уравнений ТВУС для коэффициентов теплопередачи и трения в переходном режиме обтекания для двумерных и трехмерных течений около лобовой поверхности затупленных тел, оценена их область применимости. Эти простые решения зависят от параметров набегающего потока и геометрических параметров тела и с уменьшением числа Re приближаются к решениям в свободномолекулярном режиме при коэффициенте аккомодации, равным единице.

10. На основании сравнений численных и аналитических континуальных решений с результатами расчетов методом прямого статистического моделирования Монте-Карло, с численными решениями кинетического уравнения Больцмана с интегралом столкновений в виде ВГК- модели и S- модели и с решением в свободномолекулярном режиме обтекания показана возможность применения континуальных асимптотически согласованных моделей ТВУС и ВУС для расчета теплопередачи и трения на лобовой поверхности затупленных тел в переходном режиме гиперзвукового обтекания. Преимущество континуального подхода к расчету теплопередачи и трения в задачах гиперзвукового обтекания тел разреженным газом перед применяемым в настоящее время методом Монте-Карло в том, что он требует значительно меньших затрат вычислительных ресурсов.

Достоверность результатов. Проведена оценка точности и области применимости полученных аналитических решений на основании сравнений с численными решениями различных авторов, и с данными экспериментов. Метод

подобия апробирован в рамках разных моделей вязких течений для совершенного и химически реагирующего газа; оценена его точность. Достоверность континуальных решений в переходном режиме обтекания подтверждена сравнением с численными решениями модельных кинетических уравнений и с результатами расчетов методом Монте-Карло; оценены границы применимости континуальных моделей.

Замечания по диссертационной работе:

1. Теория, развитая в диссертации, применима, прежде всего, для гиперзвукового обтекания затупленных тел. То, что она не относится к обтеканию тонких тел (например, пластин с острой передней кромкой) в тексте диссертации не оговорено, что представляет определенные неудобства при ее изучении.

2. Термин «малый Рейнольдс», часто упоминаемый в тексте последней главы диссертации неудачен, поскольку его обычно используют в теории глубоко дозвукового, безударного обтекания затупленных тел.

3. При обсуждении результатов диссертации, в выводах, желательно указывать более четко по каким параметрам потока оценивалось число Рейнольдса, т.е. то ли по параметрам набегающего потока до ударной волны, то ли по параметрам торможения после волны.

4. В задачах четвертой части работы автор исходит из уравнений Навье-Стокса, которые формально не являются пригодными для значений числа Кнудсена порядка или больше единицы. Следовало бы более ясно и подробно обосновать справедливость выводов работы для этого случая. Правда, уравнения Навье-Стокса часто оказываются применимыми и вне области малых значений чисел Кнудсена, как, например, при изучении структуры ударной волны.

Указанные недостатки не являются существенными и не снижают значения результатов, полученных в диссертации. Оценивая диссертационную работу в целом, можно констатировать ее актуальность и научную новизну и квалифицировать ее как крупное научное достижение в разработке методов исследования теплообмена и вязкого сопротивления пространственных тел, движущихся с гиперзвуковыми скоростями.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Основные результаты выполненных исследований опубликованы в 53-х научных работах, включая 34 работы из перечня ВАК РФ, и доложены на многочисленных (более 30) крупных международных и российских конференциях.

Тематика и содержание диссертации И.Г. Брыкиной отвечает паспорту специальности «01-02-05 – механика жидкости, газа и плазмы» по формуле и области исследования.

Диссертационная работа И.Г. Брыкиной «Методы расчета теплопередачи и трения при пространственном гиперзвуковом ламинарном обтекании тел во всем диапазоне чисел Рейнольдса» является законченной научно-квалификационной работой на актуальную тему и соответствует критериям п. 9

«Положения о порядке присуждения ученых степеней», которым должна удовлетворять диссертация на соискание ученой степени доктора наук. Ее автор, Брыкина Ирина Григорьевна, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры теоретической физики
физико-математического факультета

ГОУВПО "Московский государственный
областной университет"

(105005 г. Москва, ул. Радио, 10а

тел. 8-495-7800943 доб.1340, web-сайт <http://mgou.ru>)

доктор физико-математических наук,

доцент (тел. 8-906-0373099),

e-mail: kuznets-omn@yandex.ru

Михаил Михайлович Кузнецов

Подпись М.М. Кузнецова заверяю:

Проректор по научной работе

ГОУВПО "Московский государственный
областной университет"

(105005 г. Москва, ул. Радио, 10а

тел. 8-495-7800940 доб.1116, web-сайт <http://mgou.ru>)

доктор филологических наук,

профессор,

e-mail: ov.nikitin@mgou.ru



Олег Викторович Никитин

« 28 » января 2014 г.