

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. Развитие техники современных гиперзвуковых летательных аппаратов ставит перед исследователями новые задачи, одной из которых является проблема расчета теплопередачи и сопротивления тел при их трехмерном обтекании на всей траектории спуска аппаратов в атмосфере. При проектировании новых летательных аппаратов требуется проводить большое количество расчетов, поэтому, наряду с развитием «точных» численных методов моделирования трехмерных задач гиперзвукового вязкого обтекания, актуально развитие более простых, особенно аналитических, методов, не требующих больших вычислительных затрат. Диссертация И.Г. Брыкиной посвящена разработке аналитических и приближенных методов расчета теплопередачи и трения на лобовой поверхности пространственных тел для режимов ламинарного гиперзвукового обтекания – «погранслоного», «навье-стоксовского», переходного от свободномолекулярного к режиму сплошной среды, – соответствующих разным участкам траектории спуска. Учитывая вышесказанное, можно утверждать, что тема диссертационной работы, несомненно, является актуальной.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций. Обоснованность теоретических построений основана на использовании апробированных в работах автора и других исследователей математических моделей гиперзвукового течения вязкого газа при больших и умеренных числах Рейнольдса. Обоснованность применимости в переходном режиме обтекания разработанных автором математических моделей при малых числах Рейнольдса основана на строгом асимптотическом анализе при выводе этих моделей, на сопоставлении полученных с их помощью результатов расчета теплопередачи и трения с решениями кинетических уравнений и результатами расчетов методом Монте-Карло, имеющимися в литературе и полученными в работах автора, и на оценке границ применимости этих моделей. Рекомендации по применению аналитических решений, полученных в первом приближении развитого автором метода последовательных приближений, обоснованы оценкой их области применимости и точности путем сопоставления с численными решениями в широком диапазоне определяющих параметров. Разработанный метод подобия основан на существовании выявленных параметров подобия. Выводы относительно применимости метода подобия основаны на анализе многочисленных тестовых расчетов, показавших его хорошую точность для разных моделей вязких течений. В целом положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, в достаточной степени обоснованы.

Достоверность и новизна. Выделим основные новые результаты автора.

Во всех режимах гиперзвукового ламинарного обтекания затупленных тел совершенным газом получены приближенные аналитические решения для

теплового потока и компонент напряжения трения на поверхности. Решения получены для двумерных и трехмерных задач обтекания осесимметричных тел, затупленных крыльев большого удлинения под углами атаки и скольжения, окрестности плоскости симметрии и боковой поверхности пространственных тел. Для задач обтекания при больших числах Рейнольдса решения получены в рамках модели ламинарного пограничного слоя и зависят от параметров внешнего невязкого течения. При умеренных и малых числах Рейнольдса решения получены в рамках модели тонкого вязкого ударного слоя и зависят от параметров набегающего потока и геометрических характеристик тела. Аналитические решения получены разработанным автором методом последовательных приближений с применением при малых числах Рейнольдса асимптотического разложения в ряды. При стремлении числа Рейнольдса к нулю асимптотические решения для коэффициентов трения и теплопередачи переходят в решения в свободномолекулярном режиме обтекания (при коэффициенте аккомодации, равном единице).

Наибольший интерес для практического использования при больших и умеренных числах Рейнольдса представляют простые решения, полученные для относительных значений теплового потока и напряжения трения (отнесенных к значениям в точке торможения) на лобовой поверхности пространственных затупленных тел. Ранее такое решение для теплового потока было получено только для осесимметричного тела в рамках пограничного слоя. Выражения для относительных величин теплового потока и компонент напряжения трения, полученные в рамках модели пограничного слоя, зависят от параметров невязкого течения. Для относительного теплового потока в рамках тонкого вязкого ударного слоя при умеренных и больших числах Рейнольдса получены выражения, зависящие от геометрии тела, температуры поверхности, числа Прандтля, для крыльев – от угла скольжения, и не зависящие от числа Рейнольдса. При температуре поверхности много меньше температуры торможения набегающего потока, распределение относительного теплового потока по поверхности тела зависит только от его геометрии и угла атаки. Получены также выражения для относительного теплового потока, зависящие не только от геометрии тела, но и от давления, имеющие более широкую область применимости, чем модель тонкого вязкого ударного слоя.

Показано, что полученные формулы для относительного теплового потока можно применять для расчета теплопередачи на идеально каталитической поверхности пространственных тел, обтекаемых гиперзвуковым потоком химически реагирующего газа. Этот результат получен на основании многочисленных сравнений аналитических решений с численными решениями уравнений тонкого вязкого ударного слоя для многокомпонентного воздуха с учетом неравновесных химических реакций, проведенных для тел разной формы в широком диапазоне чисел Рейнольдса, показавших, что распределение относительного теплового потока по идеально-каталитической поверхности слабо зависит от характера протекания реакций в ударном слое, числа Рейнольдса, или высоты полета (ниже 90 км), и определяется, как и в совершенном газе, в основном геометрией тела и углом атаки.

Предложен эффективный метод подобия, позволяющий получать тепловой поток и напряжение трения на наветренной стороне трехмерных тел, используя численные алгоритмы расчета осесимметричных течений. Благодаря выявлению в аналитических решениях параметров подобия, связанных с геометрией тела и числом Рейнольдса, трехмерная задача определения теплопередачи и трения вдоль меридиональной плоскости пространственного тела сведена к двумерной задаче их определения на эквивалентном осесимметричном теле, параметры которого получены в зависимости от геометрии реального тела и угла атаки. При этом в двумерных уравнениях постоянное число Рейнольдса заменяется на локальное – умноженное на отношение средних кривизн пространственного и осесимметричного тел. Создана программа, конвертирующая входные данные – геометрические параметры реального тела, угол атаки и угол меридиональной плоскости в выходные параметры эквивалентного осесимметричного тела.

Метод подобия апробирован для разных режимов течения и разных газодинамических моделей путем сопоставления полученных с его помощью решений с решениями трехмерных уравнений в рамках той же модели для тел разной формы и углов атаки от 0 до 45°. Метод применим для уравнений Навье–Стокса, полного и тонкого вязкого ударного слоя, пограничного слоя во всех режимах гиперзвукового ламинарного обтекания при учете физико-химических процессов – неравновесных химических реакций внутри ударного слоя и каталитических свойств поверхности.

Следует отметить принципиальные отличия метода подобия от погранслошной осесимметричной аналогии, когда трехмерные уравнения пограничного слоя вдоль линий тока невязкого течения в предположении малого вторичного течения сводятся к двумерным. При этом требуется знание трехмерного невязкого течения, т.е. трехмерная задача не сводится полностью к двумерной, в отличие от метода подобия. Эта аналогия применима только для модели пограничного слоя, в отличие от метода подобия, применимого для разных моделей вязких течений в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Развит новый, континуальный подход к расчету теплопередачи и трения на затупленных телах в переходном от континуального к свободномолекулярному режиму обтекания. Этот подход основан на использовании при малых числах Рейнольдса асимптотически согласованных моделей вязкого ударного слоя (ВУС) и тонкого вязкого ударного слоя (ТВУС), отличающихся рядом членов от предложенных ранее при больших числах Рейнольдса общепринятых моделей ВУС и ТВУС. Впервые выведены уравнения ТВУС и ВУС при малых числах Рейнольдса из уравнений Навье–Стокса, а также асимптотически согласованные с этими уравнениями граничные условия на ударной волне и на теле. Показано, что использование этих граничных условий совместно с предложенной модификацией условия для скачка температуры на поверхности значительно расширяет границы применимости модели ВУС в сторону меньших чисел Рейнольдса и что при стремлении числа Рейнольдса к нулю асимптотически согласованная модель ТВУС дает правильные свободномолекулярные пределы (с коэффициентом аккомодации, равно единице) для коэффициентов трения и теплопередачи.

Показано, что использование асимптотически согласованных моделей ВУС и ТВУС позволяет предсказывать тепловые потоки и напряжение трения на наветренной стороне затупленных тел (с температурой поверхности много меньше температуры торможения) во всем переходном режиме обтекания. Этот вывод сделан на основании сопоставлений численных и асимптотических континуальных решений с решениями в рамках кинетических подходов: метода прямого статистического моделирования Монте-Карло, кинетического уравнения Больцмана с модельными интегралами столкновений, с решением в свободномолекулярном режиме. Это дает возможность рассчитывать трение и теплопередачу на лобовой поверхности тел, движущихся с гиперзвуковой скоростью, при любых числах Рейнольдса, используя только континуальные модели течения, что существенно экономит вычислительные ресурсы.

Достоверность аналитических решений во всех режимах ламинарного обтекания подтверждена их сравнениями с численными решениями уравнений пограничного слоя, тонкого и полного вязкого ударного слоя, Навье – Стокса, а при малых числах Рейнольдса – также с решением кинетического уравнения и с результатами расчетов методом Монте-Карло. **Достоверность** метода подобия подтверждена сравнениями полученных с его помощью решений с решениями трехмерных уравнений, проведенными в рамках разных моделей вязких течений как для совершенного, так и для химически реагирующего газа, показавшими его хорошую точность в широком диапазоне определяющих параметров. **Достоверность** континуальных результатов в переходном режиме обтекания подтверждена сравнениями с решениями модельных кинетических уравнений и полученными методом Монте-Карло.

Замечания по диссертационной работе.

1. Результаты диссертационной работы имеют важное практическое значение для определения аэротермодинамических характеристик гиперзвуковых летательных аппаратов нового поколения. Однако в диссертации нет данных о внедрении результатов исследований.
2. В диссертации нет четких рекомендаций, направленных на проектирование новых гиперзвуковых летательных аппаратов.
3. Методы и различные аппроксимации могли бы быть реализованы в едином комплексе программ. Такие программы нашли бы широкое применение в различных НИИ и КБ. К сожалению этого не сделано.

Следует отметить, что указанные недостатки не умаляют достоинств диссертации. Суммируя вышесказанное, совокупность основных результатов диссертации – аналитические решения для тепловых потоков и напряжения трения на пространственных телах во всех режимах ламинарного гиперзвукового обтекания, создание метода подобия и продвижение континуальных моделей в переходной режим – можно квалифицировать как новое научное достижение.

Автореферат, составленный с соблюдением установленных требований, в достаточной степени отражает содержание диссертации. Основные результаты выполненных исследований опубликованы в 53-х научных работах, включая 34 публикации из перечня ВАК РФ, доложены на 37-и международных и

всероссийских 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 создания методов и моделей расчета аэротермодинамики гиперзвуковых летательных аппаратов и соответствует критериям «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:

Начальник научно-исследовательского
отделения «Исследование Аэротермодинамики
гиперзвуковых летательных аппаратов и
объектов ракетно-космической техники»
ФГУП «Центральный аэрогидродинамический
Институт имени профессора Н.Е. Жуковского»
(140180 г. Жуковский, Московская обл.
ул. Жуковского, 1, тел. 8-495-5564205)
web-сайт <http://www.tsagi.ru>)

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН
(тел. 8-495-5564172,
e-mail: ivan.egorov@tsagi.ru)



31. 01. 2014

Иван Владимирович Егоров

Подпись И.В. Егорова заверяю
Ученый секретарь Ученого совета ЦАГИ
Доктор технических наук, доцент
С.А. Таковицкий



« 31 » января 2014 г.