

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

Диссертация И.Г. Брыкиной посвящена разработке эффективных приближенных методов расчета и аналитическим решениям двух- и трехмерных задач по определению теплопередачи и вязкого сопротивления (напряжения трения) наветренной части затупленных тел в широком диапазоне чисел Рейнольдса, соответствующем различным участкам траектории спуска в атмосфере Земли гиперзвуковых летательных аппаратов, включая наряду с континуальным (сплошной среды) режимом обтекания также режим переходного (больцмановского) к свободномолекулярному режиму, в котором, как правило, эти задачи не моделируются в наземных экспериментальных установках.

Одной из характерных особенностей данной диссертации является ее широкий охват математических задач гиперзвуковой аэродинамики и теплообмена, соответствующих разным режимам обтекания – «погранслоиному», «навье-стоксовскому», переходному, и получение новых и практически важных аналитических результатов по теплопередаче и трению в этих режимах. Этим диссертация принципиально отличается от работ, в которых подобные результаты получаются численно с использованием высокопроизводительных компьютеров. Такие работы по математическому и численному моделированию обтекания тел проводились на кафедре физической и вычислительной механики Томского государственного университета, их обзор приведен в диссертации.

Одним из основных математических методов для получения аналитических решений большинства задач в диссертационной работе является метод последовательных приближений, идея которого была предложена в 1970 году профессором Г.А. Тирским для решения двумерных уравнений ламинарного пограничного слоя. Этот метод был развит диссертантом для решения как пространственных уравнений ламинарного пограничного слоя, так и для решения уравнений тонкого вязкого ударного слоя с отошедшей искомой головной ударной волной. Создание этого метода для решения двух- и трехмерных задач тонкого вязкого ударного слоя является значительным научным достижением диссертанта.

Перечисление всех достойных результатов диссертации является объемной задачей, поэтому выделяются **основные новые научные результаты:**

Развит оригинальный интегральный метод последовательных приближений, активно применяемый в диссертации, для решения уравнений тонкого вязкого ударного слоя, позволивший получить как приближенные аналитические решения по первому приближению, так и численные – в виде последующих приближений. Получены также аналитические решения трехмерных уравнений пограничного

слоя как для сжимаемого газа, так и для несжимаемой жидкости.

Эффективным оказалось представление тепловых потоков на поверхности тела в виде отнесенных к тепловому потоку в критической точке. Эти относительные тепловые потоки получены в виде простых аналитических решений как уравнений ламинарного пограничного слоя в сжимаемом газе, так и уравнений тонкого вязкого ударного слоя, при обтекании под углом атаки затупленных стреловидных крыльев бесконечного размаха, в окрестности плоскости симметрии и боковой поверхности пространственных тел в зависимости от геометрических параметров обтекаемого тела (для пограничного слоя – в зависимости от параметров внешнего невязкого течения) и температуры поверхности. Получены выражения для относительных тепловых потоков в зависимости от геометрии тела и давления на поверхности, имеющие более широкую область применимости, чем модели пограничного слоя и тонкого вязкого ударного слоя. Получение тепловых потоков на пространственных телах в аналитическом виде в широком диапазоне чисел Рейнольдса является значительным научным достижением И.Г. Брыкиной.

Был получен важный результат, что эти относительные тепловые потоки слабо зависят для идеально-каталитической поверхности пространственных тел, обтекаемых гиперзвуковым потоком воздуха, от неравновесного протекания реакций диссоциации и обменных реакций в ударном слое. Это позволяет применять полученные И.Г. Брыкиной аналитические решения для расчета теплопередачи на телах, обтекаемых химически реагирующей смесью газов.

Разработан на основе обнаруженных И.Г. Брыкиной параметров подобия метод подобия трехмерных и осесимметричных вязких течений для расчета теплопередачи и трения на трехмерных телах, обтекаемых под углом атаки в широком диапазоне чисел Рейнольдса (Re) – от свободномолекулярного режима до континуального с образованием тонкого пограничного слоя.

На основании анализа аналитических решений, полученных в диссертации в предыдущих разделах методом последовательных приближений, были обнаружены два параметра подобия: угол θ между нормалью к поверхности и скоростью набегающего потока V_∞ и локальная комбинация Re/H , где H – средняя кривизна поверхности в рассматриваемой точке обтекаемой поверхности. Оказалось, что тепловой поток зависит от геометрии тела в основном через эти два параметра. Асимптотическое решение, полученное для малых чисел Re в последующей части диссертации, также выявляет эти два параметра подобия. Именно выявляет, а не получено методом догадки или методом проб и ошибок. В результате определение теплового потока и напряжения трения вдоль меридионального сечения трехмерного тела сводится к задаче его определения на таком эквивалентном осесимметричном теле, что угол θ^s меняется вдоль образующей этого тела так же, как угол θ вдоль выбранного меридионального сечения. При этом, для того чтобы совпал второй параметр подобия, двумерные

уравнения для этого осесимметричного тела модифицируются путем умножения числа Re на множитель H^s/H , где H^s – средняя кривизна поверхности этого тела.

Простота расчета трения и теплопередачи на трехмерном теле с помощью расчета двумерных уравнений с заданным эффективным числом Рейнольдса $Re^s = Re H^s/H$ является неожиданной. Этот новый метод, разработанный в диссертации, оказывается справедливым для разных моделей вязких течений. Проведено тестирование метода для реального газа для тел разной формы, обтекаемых под углом атаки до 45° . Интересно, что тестирование метода в рамках моделей тонкого и полного вязкого ударного слоя проводилось для разных моделей каталитической активности поверхности от некаталитической до идеально каталитической с учетом зависимости константы каталитичности от температуры для режимов спуска Space Shuttle. Не приводя в данном отзыве результаты обширных исследований возможностей метода подобия, отметим, что в гиперзвуковой аэротермодинамике появился новый метод, сводящий определение тепловых потоков и вязкого трения от трехмерных задач к двумерным, что является крупным научным достижением.

При детальном асимптотическом анализе уравнений Навье–Стокса в задаче гиперзвукового обтекания затупленных тел разреженным газом при малом температурном факторе был обнаружен диапазон малых чисел Рейнольдса, для которого диссертантом были выведены уравнения тонкого вязкого ударного слоя (ТВУС) и полного вязкого ударного слоя (ВУС), ранее считавшиеся справедливыми только для больших чисел Рейнольдса. Кроме того, выведены асимптотически согласующиеся с уравнениями граничные условия на ударной волне и на теле для моделей ТВУС и ВУС, использование которых дает физически правильные решения для теплового потока и напряжения трения при малых числах Рейнольдса (больших числах Кнудсена).

Получены асимптотические решения уравнений ТВУС в виде простых аналитических формул для коэффициентов трения и теплопередачи на лобовой поверхности затупленных тел при их двумерном и трехмерном гиперзвуковом обтекании разреженным газом в зависимости от параметров набегающего потока и геометрических параметров тела. Эти решения справедливы в переходном режиме обтекания и с уменьшением числа Рейнольдса переходят в решения в свободномолекулярном режиме при единичном коэффициенте аккомодации. Все результаты подтверждены сравнениями с численными решениями кинетических уравнений и решениями, полученными методом Монте-Карло.

Тем самым впервые показана возможность применения разработанных асимптотически согласованных моделей ТВУС и ВУС для расчета теплопередачи и трения на лобовой поверхности затупленных тел, обтекаемых гиперзвуковым потоком разреженного газа в переходном режиме вплоть до свободномолекулярного режима обтекания. Отметим, что при стандартных граничных условиях скольжения и температурного скачка уравнения Навье–Стокса дают физически правильные результаты по тепловым потокам на

обтекаемой поверхности до числа Кнудсена набегающего потока, равного единице. Эта неожиданная возможность продвижения континуального подхода определения вязкого сопротивления и теплопередачи в переходном режиме обтекания с асимптотическим выходом решения на свободномолекулярный режим является крупным научным достижением.

Актуальность и практическая значимость работы. Разработанные континуальные модели требуют существенно меньших затрат при вычислении тепловых потоков и сопротивления трения, чем используемые в настоящее время методы прямого статистического моделирования Монте-Карло, или решения кинетического уравнения Больцмана или модельных кинетических уравнений.

Полученные аналитические решения для теплового потока и напряжения трения на поверхности пространственных тел в широком диапазоне чисел Рейнольдса полезны для инженерных расчетов, формулировки вариационных задач, интерпретации результатов численного моделирования, корректной постановки экспериментов. Они позволяют быстро проводить многочисленные расчеты при варьировании параметров обтекания и формы тела, необходимые при проектировании новых гиперзвуковых летательных аппаратов. Эти решения полезны также для определения конвективной теплопередачи метеороидов.

Метод подобия для расчета теплопередачи и трения на лобовой поверхности пространственных тел, обтекаемых под углом атаки, позволяет решать трехмерные задачи гиперзвукового обтекания с учетом реальных физико-химических процессов в рамках полных и упрощенных уравнений Навье–Стокса, используя программы расчета осесимметричных течений, что существенно расширяет возможности их практического применения, экономит время и вычислительные ресурсы.

В проектных и научно-исследовательских институтах ракетно-космической техники имеется большой спрос на простые, достаточно точные и эффективные методы расчета теплопередачи и трения, поэтому на основании вышесказанного актуальность диссертации не вызывает сомнений.

Все научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, в достаточной степени обоснованы. Достоверность полученных результатов подтверждена сравнением аналитических решений с численными решениями и экспериментальными данными; тестированием метода подобия в рамках разных моделей вязких течений для совершенного и химически реагирующего газа; сравнением континуальных решений в переходном режиме обтекания с численными решениями кинетического уравнения Больцмана с модельными интегралами столкновений, с результатами, полученными методом Монте-Карло и с решением в свободномолекулярном режиме.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**.

1. Слабый анализ выпадения влияния физико-химических процессов, протекающих в ударном слое, на распределения по идеально-каталитической поверхности относительного теплового потока.

2. В методе подобия не разъяснено, о каком числе Рейнольдса идет речь.

3. Не отмечено, имеется ли аналогия метода подобия с известным методом локального взаимодействия, базирующимся на представлении силовых и тепловых характеристик воздействия среды на тело в некоторой точке поверхности как функции угла между направлением скорости набегающего потока и нормалью к поверхности.

Указанные недоработки не умаляют крупных научных результатов диссертации в гиперзвуковой аэротермодинамике. Текст диссертации написан ясным языком, и после небольшой редакторской доработки она может быть издана в виде монографии.

Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации. Основные положения выполненных исследований опубликованы в 53-х научных статьях, из них в 34-х – из перечня ВАК РФ, и доложены на 37 международных и российских конференциях.

Тематика и содержание диссертации И.Г. Брыкиной отвечает паспорту специальности «01-02-05 – механика жидкости, газа и плазмы» по формуле специальности 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 и соответствует критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842), которым должна удовлетворять диссертация на соискание ученой степени доктора наук. Ее автор, Брыкина Ирина Григорьевна, вполне заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой физической и
вычислительной механики
механико-математического факультета
ФГБОУВПО "Национальный исследовательский
Томский государственный университет",
заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук,
профессор

Анатолий Михайлович Гришин



Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой физической и
вычислительной механики

механико-математического факультета

ФГБОУВПО "Национальный исследовательский

Томский государственный университет"

(634050, г. Томск, пр-т Ленина, 36,

тел. 8 -3822-52-98-52, web-сайт <http://www.tsu.ru>)

заслуженный деятель науки РФ,

доктор физико-математических наук,

профессор Анатолий Михайлович Гришин

(тел. 8 -3822-52-96-69, E`mail: fire@mail.tsu.ru)