

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации 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

Исследование теплообмена и аэродинамики гиперзвуковых летательных аппаратов связано с необходимостью решения трехмерных задач обтекания вязким теплопроводным газом с учетом физико-химических процессов. Наряду с созданием новых технологий численного моделирования таких задач, требующих очень больших вычислительных затрат, всегда остается актуальным создание надежных простых приближенных и аналитических методов, позволяющих находить параметры подобия течения и быстро проводить оценочные расчеты аэротермодинамических характеристик в зависимости от высоты и скорости полета и геометрической формы тела. Работа И.Г. Брыкиной посвящена созданию эффективных приближенных методов, в том числе аналитических, расчета теплопередачи и трения на лобовой части пространственных тел, движущихся с гиперзвуковой скоростью, в широком диапазоне чисел Рейнольдса, поэтому тема диссертации является актуальной.

Отличительными особенностями диссертационной работы являются, во-первых, аналитический подход к решению сложных трехмерных задач, во-вторых, применение этого подхода во всех режимах ламинарного гиперзвукового обтекания, включая переходный режим с умеренно большими числами Кнудсена набегающего потока.

Для всех режимов гиперзвукового ламинарного обтекания получены приближенные аналитические решения для теплового потока и компонент напряжения трения на поверхности затупленных тел для двумерных и трехмерных течений совершенного газа. Решения получены в рамках моделей пограничного слоя и тонкого вязкого ударного слоя развитым автором методом последовательных приближений. Асимптотические решения при малых числах Рейнольдса имеют вид простых зависимостей от параметров набегающего потока и формы тела и переходят с уменьшением числа Рейнольдса в решения в свободномолекулярном режиме обтекания.

При больших и умеренных числах Рейнольдса получены достаточно универсальные формулы для теплового потока, отнесенного к его значению в точке торможения. Выражения для относительного теплового потока на лобовой поверхности пространственных тел в рамках тонкого вязкого ударного слоя при температуре поверхности, много меньшей температуры торможения набегающего потока, зависят только от геометрии поверхности и угла атаки. Кроме того, получены формулы, имеющие более широкую область применимости, чем модель тонкого вязкого ударного слоя. Эти формулы учитывают зависимость теплового потока также и от давления, они хорошо согласуются с численными решениями уравнений Навье-Стокса. Показано, что полученные формулы для относительного теплового потока можно применять для расчета теплопередачи на идеально каталитической поверхности пространственных тел, обтекаемых гиперзвуковым потоком реагирующего газа с учетом неравновесных химических реакций в ударном слое.

Одним из достижений диссертации является разработка оригинального метода подобия для задач гиперзвукового обтекания. Суть метода состоит в том, что трехмерная задача расчета теплопередачи и напряжения трения на пространственных телах, обтекаемых под углом атаки, сводится к двумерной задаче расчета этих величин на эквивалентных осесимметричных телах,

строящихся специальным образом для меридиональных плоскостей реального тела. Проведено тестирование метода, показавшее, что он применим для разных моделей вязких течений – уравнений Навье–Стокса, вязкого ударного слоя, пограничного слоя, для течений однородного и реагирующего газа с учетом неравновесных химических реакций и каталитических свойств поверхности. Метод подобия дает возможность применять технологии моделирования осесимметричных течений к расчету теплопередачи и трения в трехмерных течениях.

Разработан альтернативный кинетическому подходу континуальный подход к расчету теплопередачи и трения на затупленных телах, обтекаемых гиперзвуковым потоком разреженного газа в переходном режиме. Для своей реализации этот подход требует существенно меньших вычислительных ресурсов. Он основан на разработанных с помощью асимптотического анализа при малых числах Рейнольдса асимптотически согласованных моделях тонкого и вязкого ударного слоя. Возможность использовать эти модели для расчета теплового потока и напряжения трения на лобовой поверхности затупленных тел во всем переходном режиме обтекания подтверждена сравнениями с численными решениями кинетических уравнений и результатами расчетов методом прямого статистического моделирования Монте-Карло. Важно также отметить, что решение в рамках тонкого вязкого ударного слоя обладает свойством асимптотического выхода на предельное свободномолекулярное решение.

Основываясь на автореферате, можно сделать вывод, что диссертационная работа «Методы расчета теплопередачи и трения при пространственном гиперзвуковом ламинарном обтекании тел во всем диапазоне чисел Рейнольдса» является законченным научным исследованием, содержащим новые оригинальные теоретически и практически важные результаты. Работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям 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.

Главный научный сотрудник отдела № 16  
ФГБУН Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН  
(125047, Москва, Миусская пл., д.4, тел. 8 (499) 978-13-14,  
web-сайт [www.keldysh.ru](http://www.keldysh.ru), электронный адрес [office@keldysh.ru](mailto:office@keldysh.ru))  
доктор физико-математических наук, профессор  
(тел. 8(499)-250-79-10, E`mail: [telizar@mail.ru](mailto:telizar@mail.ru))

Татьяна Геннадьевна Елизарова

Подпись Т.Г. Елизаровой заверяю:

Ученый секретарь  
ФГБУН Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН  
к.ф.-м.н.



 А.И. Маслов  
« 30 » января 2014 г.