

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Брыкиной И.Г. «Методы расчета теплопередачи и трения при пространственном гиперзвуковом ламинарном обтекании тел во всем диапазоне чисел Рейнольдса», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность тематики диссертации определяется необходимостью проведения быстрых проектных расчетов при гиперзвуковом обтекании тел различной геометрии в условиях полета по траектории, а также возможностями представленных методов при подготовке и проведении стендовых и лётных испытаний. Проведённые автором исследования во всём диапазоне чисел Рейнольдса обобщают результаты прямого численного моделирования сложных трёхмерных задач обтекания с учётом физико-химических процессов, требующих, как правило, значительных затрат вычислительных ресурсов. Это определяет практическую и научную ценность проведённых исследований, которые позволяют для ламинарного режима обтекания определять тепловые потоки и напряжение трения по всей траектории полёта, на различных участках которой реализуются модели переходного, навье-стоксовского и погранслоного режимов обтекания.

Заслугой автора является получение конечных формул для теплового потока и напряжения трения в трёхмерном случае для модели совершенного газа, а также с учётом протекания химических реакций в диссоциированном воздухе для случая идеально-каталитической стенки. Эти формулы обобщают известные ранее классические результаты для окрестности лобовой критической точки и лобовой поверхности затупленного тела при осесимметричном обтекании.

Очень важный результат автора связан с разработкой метода подобия для расчета тепловых потоков и напряжения трения при пространственном обтекании, который сводит решение трёхмерной задачи к решению двумерных уравнений на эквивалентном осесимметричном теле. Пределы применимости такого подхода оценены для различных моделей вязких течений: пограничного слоя (ПС), тонкого вязкого ударного слоя (ТВУС), вязкого ударного слоя (ВУС) и уравнений Навье-Стокса для совершенного и химически реагирующего газа. Показано, что погрешность предложенного метода на лобовой поверхности вблизи точки торможения составляет от 3 до 10%, а при удалении от неё на расстояния до  $10R_0$  ( $R_0$  - характерный радиус затупления) на наветренной части боковой поверхности не превышает 15%.

Для переходного режима течения автором проведён тщательный анализ моделей ТВУС и ВУС и показано, что асимптотически согласованные модели при исправленных граничных условиях позволяют правильно оценивать коэффициенты теплопередачи и трения на лобовой поверхности затупленных тел даже для больших чисел Кнудсена.

По рассматриваемой работе могут быть сделаны следующие замечания:

1) Не оценивается возможность использования полученных формул для тел с разрывом кривизны (например, для затупленных по сфере конусов). Этот класс тел важен для практических приложений и для него имеются многочисленные теоретические и экспериментальные данные как в случае осесимметричного, так и пространственного обтекания.

2) Все результаты для пространственных задач получены в предположении их малого отличия от двумерных: течения в плоскостях стекания и растекания, метод осесимметричной аналогии, приближение малости вторичных течений. В связи с этим остаются неясными пределы их применимости для существенно трёхмерных течений, обусловленных как геометрией тела, так и большими углами атаки.

3) К сожалению, в работе не приведены результаты для существенно неизотермической обтекаемой поверхности, температура которой определяется как распределением теплового потока, так и характеристиками материалов поверхности. Какую погрешность будут давать полученные формулы в таких случаях?

4) При анализе траекторных расчётов, представленных на рис. 7, 8, полезно было бы коснуться вопроса задания граничного условия для температуры стенки и её изменения вдоль поверхности в зависимости от времени полёта.

В целом же представленная диссертация выполнена на высоком научном уровне, отличается полнотой охвата процессов по всей траектории полёта, результаты широко опубликованы и известны научной общественности. Несомненно, она удовлетворяет требованиям к докторским диссертациям, а её автор – известный специалист и учёный Брыкина И.Г. заслуживает присуждения научной степени доктора физико-математических наук.

Профессор  
Национального исследовательского  
Томского государственного  
университета  
В.И.Зинченко

Старший научный сотрудник  
НИИ прикладной математики и  
механики ТГУ,  
В.Д.Гольдин



Профессор механико-математического факультета  
ФГБОУВПО "Национальный исследовательский  
Томский государственный университет"  
(634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
Тел. (3822)52-98-52. Факс (3822)52-95-85  
Web-сайт: <http://www.tsu.ru> E-mail: [rector@tsu.ru](mailto:rector@tsu.ru))  
доктор физико-математических наук,  
профессор Зинченко Владислав Иванович  
(тел.: 8-909-543-52-18, E-mail: [vladislav.zinchenko@bk.ru](mailto:vladislav.zinchenko@bk.ru))

Старший научный сотрудник  
НИИ прикладной математики и механики  
ФГБОУВПО "Национальный исследовательский  
Томский государственный университет"  
(634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
Тел. (3822)52-98-52. Факс (3822)52-95-85  
Web-сайт: <http://www.tsu.ru> E-mail: [rector@tsu.ru](mailto:rector@tsu.ru))  
Гольдин Виктор Данилович  
(тел. 8-901-610-11-48. E-mail: [vdg@math.tsu.ru](mailto:vdg@math.tsu.ru))