

**ВОЕННО-ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ
"НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ МАШИНОСТРОЕНИЯ"**



**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ВОЕННО-ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
МАШИНОСТРОЕНИЯ»**

(ОАО «ВПК «НПО машиностроения»)
ул. Гагарина, д. 33, г. Реутов, Московская область, 143966
телеграфный: Реутов Московской ВЕСНА (АТ346416)
Тел.: (495) 528-30-18 (канцелярия) Факс: (495) 302-20-01
E-mail: vpk@promash.ru http://www.promash.ru
ОКПО 07501739, ОГРН 1075012001492
ИНН/КПП 5012039795/509950001

25 февраля 2014 № *127/127*

Учёному секретарю
диссертационного совета Д 501.001.89
при ФГБОУВПО
МГУ имени М.В. Ломоносова
доктору физико-математических наук
В. В. Измоденову

119991, г. Москва,
ГСП-1, Ленинские горы, д. 1,
МГУ имени М.В. Ломоносова

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

Приложение: 1. Отзыв, экз. №1 и №2, на 4-х листах каждый экземпляр

Ученый секретарь НТС

ОАО «ВПК «НПО машиностроения»,

к.ф.-м.н.

Точилон Л. С.

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Брыкиной Ирины Григорьевны “МЕТОДЫ РАСЧЁТА 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 посвящена решению актуальной проблемы: разработки эффективных приближенных методов, ориентированных на быстрый расчет тепловых потоков и сил трения, при гиперзвуковом ламинарном обтекании летательных аппаратов (ЛА) в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса (Re) для континуального, переходного и близкого к свободномолекулярному режимов течения газа.

Экспериментальные исследования (наземные в аэродинамических трубах и летные в натуральных условиях), а также численное моделирование трехмерного обтекания тел сложной формы с использованием уравнений Навье – Стокса (НС) с учетом физико-химических процессов связаны с большими затратами материальных ресурсов и времени. В связи с этим актуальна разработка приближенных и аналитических методов, которые необходимы при анализе результатов трубного и натурального экспериментов, интерпретации результатов численного моделирования и проведении многовариантных расчетов в КБ при проектировании перспективных ЛА.

В части I диссертации при больших числах Re в рамках теории ламинарного пограничного слоя (ПС) исследуется трехмерное обтекание тел.

В первом разделе рассматриваются течения в ПС на затупленных стреловидных крыльях бесконечного размаха и на осесимметричных телах, обтекаемых сверхзвуковым потоком газа под углами атаки $\alpha \neq 0$. Автором диссертации получены аналитические решения для коэффициентов трения и теплопередачи, компонент скорости и энтальпии.

Во втором и третьем разделах исследуется течение в пространственном ПС при обтекании сжимаемым газом 3D затупленных тел с учетом угла атаки и параметров вдува (отсоса) газа. Автором диссертации получено, что распределения вдоль поверхности затупленных тел теплового потока и напряжения трения слабо зависят от температуры поверхности (T_w) и отношения удельных теплоемкостей (γ). При обтекании 3D затупленного тела с учетом

угла атаки скорректировано положение точек максимального значения теплового потока и коэффициента трения. Путем сравнения с результатами численных расчетов и с результатами экспериментов показано, что погрешность полученных диссертантом аналитических решений не превышает 5%.

В четвертом разделе автором диссертации получены формулы для определения теплового потока к идеально каталитической поверхности затупленного тела, обтекаемых сверхзвуковым потоком химически реагирующего газа.

В пятом разделе рассмотрено течение несжимаемой жидкости в трехмерном ПС на произвольной гладкой поверхности и получено аналитическое решение для компонент скорости и напряжения трения. Результаты расчетов по полученным формулам линий отрыва и компонент напряжения хорошо совпали с результатами экспериментов.

В шестом разделе на примере автомодельной задачи автором диссертации доказана сходимость метода последовательных приближений для уравнений погранслояного типа.

В части II диссертации для режимов, соответствующих полету в атмосфере Земли на высотах $H=60, 100$ км, в рамках системы уравнений НС или ее различных упрощенных моделей исследуется трехмерное гиперзвуковое обтекание затупленных тел.

В первом, втором и третьем разделах для случая осесимметричных и затупленных крыльев большого удлинения обтекаемых под углами атаки α и скольжения β автором диссертации разработан метод последовательных приближений для решения уравнений тонкого вязкого ударного слоя (ТВУС); получено аналитическое решение для коэффициентов теплопередачи и трения, компонент скорости, энтальпии, давления и отхода ударной волны (УВ); на примере сферы и эллипсоида показана хорошая точность полученных решений; исследовано влияние эффектов скольжения и продольных градиентов давления на величины теплового потока и трения.

Во четвертом и пятом разделах проведенными численными исследованиями распределения относительного теплового потока на боковой поверхности затупленных 3D тел при $Re \geq 50$ автор диссертации подтвердил, что относительный тепловой поток определяются в основном геометрией тела. Для расчета относительного теплового потока в плоскости симметрии автором диссертации получены формулы, обладающие более широкой областью применимости; приведены примеры расчетов для тел разной формы под углами атаки в широком диапазоне $Re=50 - 5 \times 10^4$.

В шестом разделе автором диссертации предложен метод определения тепловых потоков для 3D тел, обтекаемых химически неравновесным многокомпонентным газом с учетом каталитической рекомбинации атомов, скольжения и скачка температуры на стенке. Приведенными примерами расчетов по полученным формулам автором диссертации показано, что относительный тепловой поток на идеально каталитической поверхности определяется в основном геометрией тела и слабо зависит от характера протекания химических реакций в ударном слое

В части III диссертации разработан метод подобия для расчета теплопередачи и трения на 3D телах, обтекаемых под углом атаки $\alpha \neq 0$ в широком диапазоне значений Re : от режима течения разреженного газа, когда вязкость существенна во всей возмущенной области течения, до режима с явно выраженным пограничным слоем.

Диссертантом установлены два параметра подобия: местный угол атаки элемента поверхности тела и параметр Re/H , где H - средняя кривизна поверхности. С помощью обнаруженных критериев задача определения тепловых потоков для 3D реального тела сведена к задаче определения его на эквивалентном осесимметричном теле (ЭОТ).

В разделах 1-3 диссертантом проведено тестирование метода подобия, которое показало, что метод подобия позволяет с хорошей точностью определять тепловые потоки и трение на 3D телах, обтекаемых под углом атаки многокомпонентным химически реагирующим газом независимо от каталитических свойств поверхности.

От известного метода осесимметричной аналогии предложенный диссертантом метод подобия отличается простотой и возможностью его применения в широком диапазоне чисел $Re = 1 \dots 10^4$.

В части IV диссертации исследуется возможность применения континуального подхода для расчета теплопередачи и трения в переходном режиме гиперзвукового обтекания при малых числах Re .

В разделах 1-3 диссертантом получены аналитические решения для расчета коэффициентов теплопередачи и трения; проведено сравнение с известными результатами расчетов методом Монте-Карло и экспериментов; определены границы применимости полученных формул с приемлемой погрешностью.

По автореферату необходимо сделать следующее замечание.

Автор диссертации ограничился подробным исследованием зависимостей коэффициентов теплообмена и трения. Исследование значений коэффициентов давления позволило бы рассчитать аэродинамические характеристики (АХ) ЛА, что очень важно для практических приложений, тем более, что необходимый

материал для расчета АХ в работе есть.

Приведенное замечание в целом не меняют общего положительного впечатления о выполненной диссертационной работе, посвященной решению актуальных для практики задач. Полученные результаты автор диссертации обосновал большим количеством опубликованных работ.

Диссертационная работа И. Г. Брыкиной, судя по автореферату, представляет собой законченное научное исследование на актуальную тему. Она удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, И. Г. Брыкина, вполне заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05-механика жидкости, газа и плазмы.

Начальник отделения аэродинамики и баллистики
ОАО "ВПК "НПО машиностроения"
(143966), Московская область, г. Реутов, ул. Гагарина, д.33,
Тел. (495) 528-30-18 (канцелярия)
кандидат физико-математических наук,
(тел. (495) 528-17-90)

Юрий Алексеевич Прохорчук

Начальник отдела аэродинамики и теплообмена
доктор технических наук
(тел. (495) 528-31-12)

Владимир Пантелеевич Котенев

Старший научный сотрудник
кандидат технических наук
(тел. (495) 528-31-12)

Мазит Ахметович Закиров

Подписи Ю. А. Прохорчука, В. П. Котенева и
М. А. Закирова заверяю:

Ученый секретарь НТС
ОАО "ВПК "НПО машиностроения"
кандидат физико-математических наук
(тел. (495) 300-93-14)



Леонид Сергеевич Точиллов