

УДК 536.46:536.245.022

## АЭРОДИНАМИКА И СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛОМАССОБМЕН ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ С УЧЕТОМ ОСЛОЖНЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

© 2011 г.

*В.И. Зинченко<sup>1</sup>, В.Д. Гольдин<sup>2</sup>, К.Н. Ефимов<sup>1</sup>*

*В.А. Овчинников<sup>2</sup>, А.С. Якимов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Томский госуниверситет

<sup>2</sup>НИИ прикладной математики и механики Томского госуниверситета

fire@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Исследуются трехмерные задачи влияния сопряженного тепломассообмена (ТМО) на аэродинамические и тепловые характеристики обтекания сверхзвуковыми потоками воздуха затупленного по сфере конуса с учетом различных осложняющих факторов, в число которых входят гомогенные и гетерогенные химические реакции, различные процессы разрушения материала тела, вращение вокруг продольной оси.

*Ключевые слова:* аэродинамика, сопряженный тепломассообмен, химические реакции, вращение, сверхзвуковое обтекание, разрушение материала.

### Введение

Полет со сверхзвуковыми скоростями в плотных слоях атмосферы сопровождается динамическими, тепловыми и химическими процессами на поверхности и в объеме материала обтекаемого тела. Эти воздействия могут вызывать изменение их формы и оказывают влияние на аэродинамические характеристики [1]. Наличие данных факторов вызывает необходимость повышения точности предсказания характеристик взаимодействия газовых потоков с телами. Такой характер протекания процессов приводит к необходимости решения задачи в сопряженной постановке. Это позволяет существенно повысить точность определения аэродинамических и тепловых характеристик по сравнению с отдельными оценками аэродинамики, разрушения и параметров движения тела.

### Постановка задачи

Рассматривается движение затупленного тела по траектории в атмосфере с гиперзвуковой скоростью, которая не превышает первой космической. Для описания движения газового потока используются различные системы упрощенных уравнений Навье–Стокса [2]. Учитываются наличие ламинарного, переходного и развитого турбулентного режимов течения в ударном слое [3–5], протекающие гомогенные химические реакции между основными компонентами воздуха

и продуктами термохимического разрушения материала тела [6].

Для описания теплового состояния тела выписывается система уравнений сохранения для пористой среды [2]. Учитываются различные процессы разрушения и фильтрация выделяющихся газов на поверхности и в глубине материала. Численное исследование данной задачи производится в условиях переменных внешних условий.

Также рассматривается сопряженная задача аэродинамического нагрева затупленного конуса, обтекаемого под углом атаки и вращающегося вокруг своей продольной оси. Течение в пограничном слое (ПС) рассчитывается на основе модели пространственного ламинарного пограничного слоя; прогрев теплозащитного покрытия (ТЗП) – на основе одномерного уравнения теплопроводности с учетом термического разложения материала и фильтрации выделяющихся газов. Решения в пограничном слое и в теле связываются условиями сопряжения.

Влияние вращения определяется параметрами:

$$\Omega = \frac{\omega R_N}{V_*}, \quad K = \omega t_*, \quad t_* = (\rho c \lambda)_s \left( \frac{T_{e0} - T_0}{q_*} \right)^2,$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $t$  – время;  $R_N$  – радиус затупления;  $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $c$  – плотность, теплопроводность и теплоемкость ТЗП;  $T$ ,  $q$  – температура, тепловой поток. Индексы  $s$ ,  $*$ ,  $e0$ ,  $0$  – относятся твердому телу, характерным величинам, величинам в точке торможения невязкого потока и

значениям в начальный момент времени соответственно.

### Описание результатов

Разработаны физическая и математическая модели для расчета сопряженного ТМО при пространственном обтекании затупленного по сфере конуса гиперзвуковым потоком воздуха. Проведены расчеты в различных сочетаниях режимов протекания гомогенных и гетерогенных химических реакций для различных режимов течений в ударном слое, режимов протекания разрушения обтекаемого тела в условиях сопряженного тепломассообмена. На основе этих расчетов исследуются вопросы правомерности использования различных постановок задачи и приведены оценки точности таких подходов. Рассмотрен вопрос об описании аналитическими выражениями различных режимов термохимического разрушения тела из углерод-углеродных конструкционных материалов (УУКМ). Проведен анализ относительных вкладов различных механизмов разрушения ТЗП и процесса разрушения в целом.

Численное решение задачи аэродинамического нагрева затупленного конуса с учетом вращения получено в предположении:

$$\Omega \ll 1, \quad K = O(1), \quad \alpha = O(1),$$

в уравнениях ПС сохраняются только члены порядка  $\Omega$ ,  $\Omega \sin \alpha$ .

Результаты расчетов показывают, что распределения температуры поверхности тела, а также массового расхода вдуваемых в ПС газов не имеют симметрии относительно плоскости угла атаки. Ранее этот эффект приближенно оценивался в работе [7].

Эта асимметрия приводит к асимметрии компонент трения, что вызывает появление боковой силы, момента рыскания и момента крена, действующих на тело. Соответствующие аэродинамические коэффициенты можно представить в виде:  $f = f^{(0)} + f^{(1)}$ , где  $f^{(0)}$  обусловлено тепловой асимметрией, а  $f^{(1)}$  – асимметрией поля течения в ПС. На рис. 1, 2 эти величины показаны в зависимости от удлинения тела. Здесь кривая 1 соответствует коэффициенту боковой силы, 2 – коэффициенту момента рыскания, 3 – коэффициенту момента крена. Результаты приведены для тела с углом конусности  $9^\circ$ , обтекаемого под углом атаки  $10^\circ$ , при значениях параметров  $M_\infty = 6$ ,  $\Omega = 7.9 \cdot 10^{-6}$ ,  $K = 0.25$ .

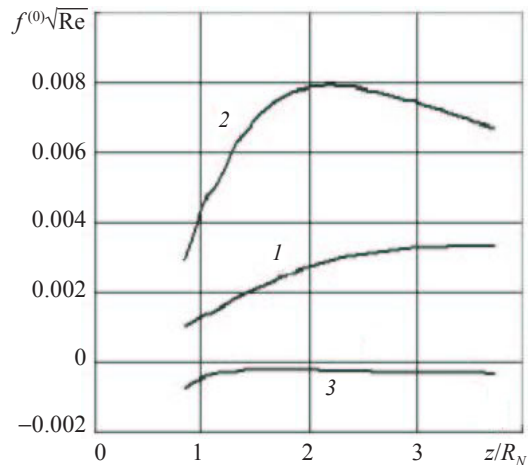


Рис. 1. Аэродинамические коэффициенты, обусловленные асимметрией прогрева

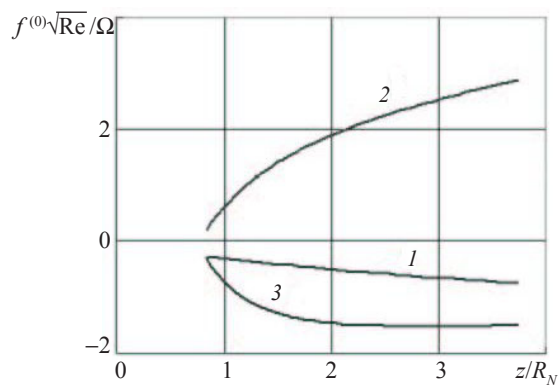


Рис. 2. Аэродинамические коэффициенты, обусловленные вращением

**Работа выполнена при финансовой поддержке ЕЗН-1.19.09**

#### Список литературы

1. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 391 с.
2. Зинченко В.И. Математическое моделирование сопряженных задач тепломассообмена. Томск: Изд-во ТГУ, 1985. 221 с.
3. Себечи Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. М.: Мир, 1987. 590 с.
4. Патанкар С., Сполдинг Д. Тепло- и массообмен в пограничных слоях. М.: Энергия, 1970. 127 с.
5. Чен К., Тайсон Н. Применение теории турбулентных пятен Эммонса к обтеканию затупленных тел // Ракетная техника и космонавтика. 1971. Т. 9, №5. С. 63–80.
6. Park C. Nonequilibrium hypersonic aerothermodynamics. New York: John Wiley and sons, 1990. 220 p.
7. Гофман А.Я. и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. 2006. С. 369–370.

**AERODYNAMICS AND CONJUGATE HEAT AND MASS EXCHANGE FOR SUPERSONIC FLOWS  
AROUND BLUNT BODIES ACCOUNTING FOR COMPLICATING FACTORS***V.I. Zinchenko, V.D. Goldin, K.N. Efimov, V.A. Ovchinnikov, A.S. Yakimov*

Aerodynamics and heat and mass exchange features of three-dimensional supersonic flows around sphere-cone are investigated, taking into account different complicating factors including homogeneous and heterogeneous reactions, various processes of material failure, rotation around a longitudinal axis.

*Keywords:* aerodynamics, conjugated heat and mass exchange, chemical reactions, rotation, supersonic flow, material's destruction.