

# Численное моделирование обтекания перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов газовыми потоками\*

Ю.И. Димитриенко, А.А. Захаров, М.Н. Коряков, В.В. Парамонов,  
А.С. Аббакумов

15 марта 2011 г.

При гиперзвуковых скоростях полета температура на поверхности тела может повышаться до 2000–3000К и появляется проблема учета химических реакций и образования плазмы. Целью работы является разработка численных алгоритмов и программного обеспечения для моделирования газодинамических процессов гиперзвукового ( $M < 10$ ) обтекания тел сложной формы, проведение с их помощью численного моделирования и определение полей механических и температурных напряжений, а также концентраций химических компонент газа в ответственных узлах ракетно-космических и летательных аппаратов.

В работе рассматривается разработанный авторами программный комплекс “Сигма” для моделирования нестационарных сверхзвуковых и гиперзвуковых газовых потоков в областях сложной формы с криволинейными границами. Программный комплекс имеет структуру, подобную общим системам обеспечения газодинамических расчетов [1, 2, 3] и позволяет проводить моделирование двумерных, осесимметричных и трехмерных течений идеального и вязкого газа в декартовых и цилиндрических системах координат. Программный комплекс состоит из модуля трехмерного геометрического моделирования для задания облика конструкций, модуля задания свойств, параметров и начальных данных, генератора адаптивной сетки (препроцессора), расчетного модуля (процессора) и визуализатора расчетов (постпроцессора). Большинство итерационных процедур генерации сеток и расчетного модуля могут выполняться в параллельном режиме на кластере или многоядерном компьютере с общей памятью.

Модуль препроцессора имеет графический интерфейс, позволяющий визуально создавать геометрические образы. Особенностью задания геометрии области является “обратный” метод построения, когда из примитивов путем их деформации и

---

\*Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ МК-2498.2011.8

стыковки собирается исходная геометрия области. Реализованы следующие типы примитивов: прямоугольный параллелепипед, сектор цилиндра, примитивы в виде O-сеток для построения областей с особенностями. Форма примитивов определяется опорными точками бисплайнов, образующих грани примитивов, и модификация заготовки происходит с помощью изменения координат опорных точек. С каждым примитивом связан набор характеристик: тип начального условия в области примитива; типы граничных условий на его гранях; габариты примитива в вычислительных и физических координатах.

На основании полученной геометрии примитивов и определения их характеристик, а также на основе введенных количеств разбиений по трем координатным направлениям осуществляется генерация адаптивной сетки, имеющей ленточную структуру [3]. Имеется возможность сгущения сетки к заданным границам расчетной области. Поддерживаются три управляющие сгущением функции.

В расчетном модуле используются стандартные математические модели ламинарных течений с учетом теплопроводности газа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} &= 0, & \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} + p \mathbf{E} - \mathbf{T}_v) &= \mathbf{0}, & p &= R \rho \theta, & \mathbf{q} &= -\lambda \nabla \theta, \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot ((\rho E + p) \mathbf{v} - \mathbf{T}_v \cdot \mathbf{v} + \mathbf{q}) &= 0, & \mathbf{T}_v &= \mu_1 (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{E} + \mu_2 (\nabla \otimes \mathbf{v} + \nabla \otimes \mathbf{v}^T), \end{aligned}$$

а также уравнения химической кинетики:  $\frac{d\gamma_i}{dt} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{U} = \dot{W}_i$ , где  $\mathbf{U} = -\rho D_i \nabla \gamma_i$  — массовый поток  $i$ -й компоненты вследствие диффузии,  $\dot{W}_i$  — источник образования  $i$ -й компоненты,  $\gamma_i$  — массовая концентрация  $i$ -й компоненты смеси.

Основой вычислительного алгоритма расчетного модуля являются явные модифицированные конечноразностные схемы типа Мак-Кормака и TVD для разрешения невязкой части системы уравнений; вязкая часть аппроксимируется при помощи неявной разностной схемы (метод расщепления по координатным направлениям), которая разрешается методами прогонки; уравнения химической кинетики разрешаются в 2 этапа. Сначала при помощи полностью неявного метода Ньютона совместно решается система разностных уравнений с источниковыми членами  $\rho \frac{\partial \gamma_i}{\partial t} = \dot{W}_i$ . Затем учитывается диффундирование компонентов смеси  $\frac{d\gamma_i}{dt} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{U} = 0$ . Уравнения последней системы решаются последовательно и независимо друг от друга методом прогонки [4].

Для распараллеливания алгоритмов генерации сетки и численного решения использовались методы геометрического параллелизма и SPMD-модель вычислений. При программной реализации применялись библиотеки MPI 1.1 и OpenMP 2.0. Расчеты проводились на суперкомпьютере СКИФ МГУ “Чебышев”.

На рис.1 представлены установившиеся распределения химических концентраций газового потока на входе в канал сверхзвукового осесимметричного воздухозаборника

для  $M = 8$ . На рис.2 представлены установившиеся распределения температуры и давления газа вблизи локальных элементов на поверхности конструкции для  $M = 6$ .



Рис. 1: Распределения концентраций кислорода  $O_2$ (слева) и ионов  $NO^+$ (справа) на входе в канал диффузора

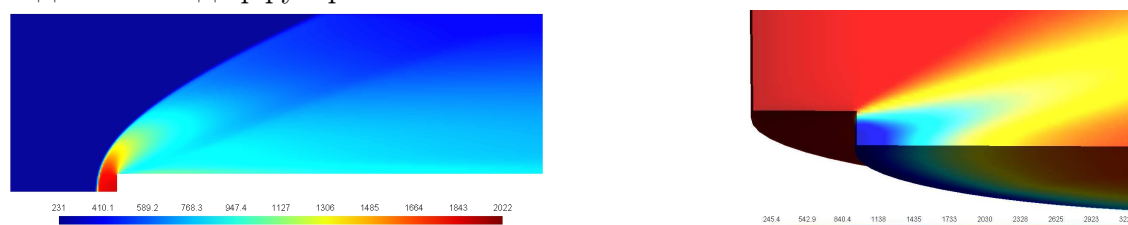


Рис. 2: Распределения температуры (К) при обтекании поперечного стыка отсеков корпуса (слева) и давление (Па) на поверхности круглого отверстия в конструкции аппарата (справа)

## Список литературы

- [1] Б.Н. Четверушкин, Е.В. Шильников. Вычислительный и программный инструментарий для моделирования трехмерных течений вязкого газа на многопроцессорных системах // Журнал вычислительной математики и математической физики. - 2008. - Т. 48, №. 2. - С. 309-320.
- [2] Ю.И. Димитриенко, А.А. Захаров. Автоматизированная система для моделирования газовых потоков методом ленточных адаптивных сеток // Информационные технологии. - 2009. № 6. - С. 12-16.
- [3] Ю.И. Димитриенко, А.А. Захаров. Метод ленточных адаптивных сеток в газовой динамике. -М.: Изд-во НТЦ "Университетский", 2008. -175 с.
- [4] Д.А. Забарко, В.П. Котенёв. Численное исследование ламинарных течений вязкого химически реагирующего газа около затупленных тел // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. "Естественные науки".- 2006. № 1.- С. 77-95.