

УДК 536.3

РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛОБМЕН ПРИ ОБТЕКАНИИ ПЛОСКОСТИ ГИПЕРЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ГАЗА ОТ СФЕРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА

© 2011 г.

Н.Н. Пилюгин

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

pilyugin@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Получено асимптотическое решение уравнений радиационной газодинамики, описывающих стационарное взаимодействие двух гиперзвуковых потоков газа, истекающих из двух идентичных сферических источников. В ударном слое около контактной плоскости использовался модифицированный метод разложения искомых функций по малому параметру – отношению плотностей газа в набегающем потоке и за ударной волной. В предположении, что газ в ударном слое находится в локальном термодинамическом равновесии и в нем происходит объемное высвечивание, в аналитическом виде получено распределение газодинамических функций и температуры. Форма ударной волны и распределение лучистого потока на плоскости найдены в виде квадратур. Исследованы зависимости формы ударной волны и лучистого потока от параметров задачи.

Ключевые слова: гиперзвуковое течение, сферический источник, радиационный тепловой поток, асимптотическое решение.

1. Постановка задачи и основные предположения

Рассматривается столкновение двух гиперзвуковых потоков газа от одинаковых сферических источников, расстояние между центрами которых равно $2D$. В силу симметрии контактная поверхность представляет собой плоскость, расположенную на расстоянии D от центра каждого источника. Схема течения и обозначения приведены в [1]. Вводится цилиндрическая система координат, связанная с контактной плоскостью. Расстояние x отсчитывается от оси симметрии вдоль плоскости, расстояние y – по нормали к ней. Положительные значения u направлены к центру источника. Все размеры отнесены к D .

При переходе газа через скачок уплотнения температура и давление в ударном слое значительно возрастают. Поэтому рассматривается влияние излучения газа на параметры течения в сжатом ударном слое, а в области от источника до ударной волны (УВ) влиянием излучения на течение пренебрегается.

2. Решение в области течения от источника до ударной волны

Рассмотрим сферически-симметричное гиперзвуковое невязкое адиабатическое течение

от источника с эффективным радиусом R_* , на поверхности которого заданы: число Маха M_* , плотность ρ_* , радиальная скорость U_* , давление p_* и энтальпия газа h_* . Тогда решение газодинамических уравнений на произвольном расстоянии r от центра источника можно получить в неявном виде [1]. В случае, когда на источнике реализуется гиперзвуковая скорость и выполняются неравенства: $(\gamma - 1)M_*^2 \gg 1$, $(\gamma - 1)M_*^2 \gg 1$, где γ – эффективное отношение теплоемкостей, получаются явные зависимости [1] газодинамических параметров от r . Для определения параметров на УВ со стороны набегающего от источника потока в этих зависимостях [1] следует положить $r = R_s(x)$, где $R_s(x)$ – функция, определяющая форму УВ.

3. Система уравнений в ударном слое

Для дальнейшего исследования вводятся безразмерные величины и переменные такие же, как в [1]. Уравнение состояния для энтальпии зададим по форме, как для совершенного газа [1], полагая эффективное отношение теплоемкостей γ постоянным в выбранном интервале температур. Система уравнений, описывающая течение невязкого, нетеплопроводного, химически равновесного объемно излучающего газа в ударном слое около контактной плоскости, записанная в переменных Мизеса,

совпадает, кроме уравнения энергии, с системой уравнений из [1]. В уравнении энергии для рассматриваемого случая содержится дивергенция лучистого потока $Q = \text{div } \mathbf{q}_R$ в ударном слое, который для расчета переноса излучения рассматривается как локально-одномерный плоский слой газа [2]:

$$Q = 4k_p(p, T)\sigma T^4, \quad (1)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана, T – температура, p – давление, k_p – коэффициент поглощения Планка, который аппроксимируется в определенном интервале температур $3000 \text{ K} \leq T \leq 12000 \text{ K}$ и давлений $0.01 \text{ М} \leq p \leq 100 \text{ атм}$ в виде [2]:

$$k_p = ApT^n, \quad n = 8.7. \quad (2)$$

В качестве граничных условий на скачке используются обычные соотношения Рэнкина–Гюгонио [1, 2], на контактной плоскости задается условие непротекания.

4. Асимптотическое решение в ударном слое и результаты

В ударном слое около плоскости в окрестности оси симметрии решения уравнений РГД находятся в виде модифицированного разложения искомых функций по малому параметру ε – отношению плотностей газа в набегающем потоке и за ударной волной [1]. В отличие от классического метода Г.Г. Черного [3], здесь учитывается поправка к касательной составляющей скорости. Как показало сравнение, такая модификация метода приводит к значительному (до 50%) уточнению отхода УВ и, следовательно, к уточнению величины лучистого потока к поверхности. Из полученного решения следует, что на профиль энтальпии, форму УВ и лучистый тепловой поток $q(x)$ влияют параметры, связанные с излучением: показатель степени n в формуле (1) и параметр излучения

$$b_R = \frac{8A\sigma R_A}{\mu U_*^3} D \left(\frac{U_*}{2C_p} \right)^{n+5}, \quad (3)$$

где R_A – универсальная газовая постоянная, μ – молекулярная масса газа, C_p – эффективная теплоемкость газа при постоянном давлении, а также параметр $b = 2(\gamma - 1)/\gamma$. На рис. 1 в качестве примера расчета показано влияние параметров b и n на распределение потока $q(x) = q_R(x)/q_R(0)$ по плоскости для $b_R = 1.0$. Расчеты при $b = 0$ соответствует случаю, когда не учитывается поправка к касательной составляющей скорости. Кривые 1–3 соответствуют $n = 4.0$; кривые 4–6 – $n = 8.0$; (1, 4 – расчет при $b = 0$; 2, 5 – при $b = 0.334$; 3, 6 – при $b = 0.571$).

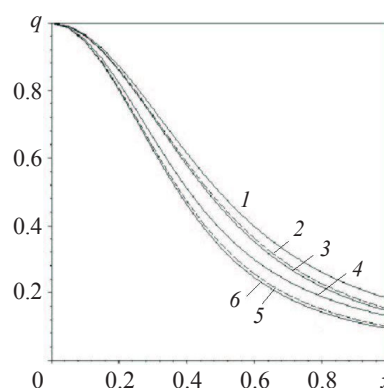


Рис. 1

Работа поддержана Роснаукой (государственный контракт 02.740.11.0615).

Список литературы

1. Пилюгин Н.Н. Аналитическое решение задачи о столкновении двух гиперзвуковых потоков газа от симметричных источников // ПМТФ. 2010. Т. 51, №2. С. 61–70.
2. Пилюгин Н.Н., Тирский Г.А. Основы динамики излучающего газа. М.: Изд-во МГУ, 1989. 309 с.
3. Черный Г.Г. Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М.: Физматгиз, 1959. 220 с.

RADIATION HEAT FLUX ON A FLAT PLATE IN THE HYPERSONIC GAS FLOW FROM A SPHERICAL SOURCE

N.N. Pilyugin

The asymptotic solution of the equations of radiation gasdynamic, describing stationary interaction of two hypersonic gas flows from two identical spherically symmetric sources is obtained. In a shock layer near the contact plane, the modified method of expansion of the sought functions with respect to a small parameter, which is the ratio of gas densities in the incoming flow and behind the shock wave is used. In the assumption that the gas in a shock layer is in thermodynamic equilibrium and that volume radiation takes place in it, the analytical solution for the distribution of gas-dynamics function and temperature is obtained. The form of a shock wave and the distribution of radiation heat flux on a plane are found in the form of quadratures. Dependence of the form of a shock wave and radiation heat flux on the parameters of the problem are investigated.

Keywords: hypersonic flow, spherical source, radiation heat flux, asymptotic solution.