

СВЕРХЗВУКОВОЕ НЕРАВНОВЕСНОЕ ОБТЕКАНИЕ СЕГМЕНТАЛЬНЫХ ТЕЛ СМЕСЬЮ, МОДЕЛИРУЮЩЕЙ АТМОСФЕРУ ВЕНЕРЫ

Л. И. ТУРЧАК

(Москва)

Изложены результаты расчетов обтекания лобовой части тел сегментальной формы смесью $0.94(\text{CO})^2 + 0.05(\text{N}_2) + 0.01(\text{Ar})$. Приведено изменение распределения температуры, давления и концентраций в зависимости от давления перед ударной волной и от скорости движения тела. Анализ распределения концентраций позволяет сформулировать упрощенную модель кинетики химических реакций в ударном слое, отражающую основные закономерности течения. На примере распределений плотности проверена справедливость закона бинарного подобия во всей рассчитываемой области ударного слоя.

В работе [1] рассматривалось обтекание сферического затупления газовой смесью $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{Ar}$ различного состава. Изучены основные свойства течения в ударном слое, в частности зависимость течения от концентрации CO_2 и N_2 в набегающем потоке.

В литературе [2, 3] появились новые уточненные данные по свойствам атмосферы Венеры. Одна из основных особенностей, не известных ранее, состоит в преобладании концентрации углекислого газа. Это позволяет более точно поставить задачу о движении затупленного тела в атмосфере Венеры и сосредоточить внимание на уточнении термодинамических и кинетических характеристик CO_2 , которые необходимо закладывать в расчет.

Задача о сверхзвуковом неравновесном обтекании затупленного тела решена в рамках постановки работы [4].

Обозначения

V_∞ — скорость движения тела, ε — отход волны, \mathcal{R} — универсальная газовая постоянная, κ_j — отношение «замороженных» теплоемкостей, hRt_∞ / m_∞ — энтальпия единицы массы.	c_p — теплоемкость при постоянном давлении, $\gamma(X)$ — концентрация компоненты X (число частиц в единице массы), R — радиус кривизны тела в критической точке, ω_j — скорость j -химической реакции.
---	---

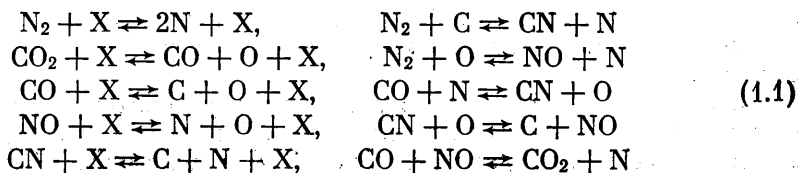
в невозмущенном потоке

p_∞ — давление,
 ρ_∞ — плотность,
 T_∞ — температура,
 m_∞ — молекулярный вес.

в ударном слое

$p\rho_\infty V_\infty^2$ — давление,
 $\rho\rho_\infty$ — плотность,
 TT_∞ — температура,
 mm_∞ — молекулярный вес.

1. Физико-химическая модель нагретой ударной волной смеси аналогична использованной в [1]: смесь предполагается состоящей из девяти компонент (Ar , N_2 , CO_2 , CO , NO , CN , C , O , N), между которыми протекают десять химических реакций



Выражения для скоростей химических реакций, а также для констант равновесия и энтальпий компонент приведены в [1].

Предполагается, что все внутренние степени свободы частиц смеси возбуждены равновесно, поскольку времена релаксации этих процессов на несколько порядков ниже времен диссоциации компонент ([1]). Для решения задачи использован метод работы [5]. Сущность метода состоит в том, что полная система уравнений задачи разбивается на две: уравнения газовой динамики и релаксационные уравнения для определения концентраций компонент смеси. Первая из них решается по явной схеме (методом Рунге — Кутты), а для решения второй системы используется неявная разностная аппроксимация уравнений вдоль линий тока. Решение задачи находится путем итераций между системами на каждом расчетном слое.

2. Контур сегментального тела вращения со скруглением в месте сопряжения лобовой части (близкой к сфере) с боковой частью (близкой к конусу) задается аналитическим соотношением

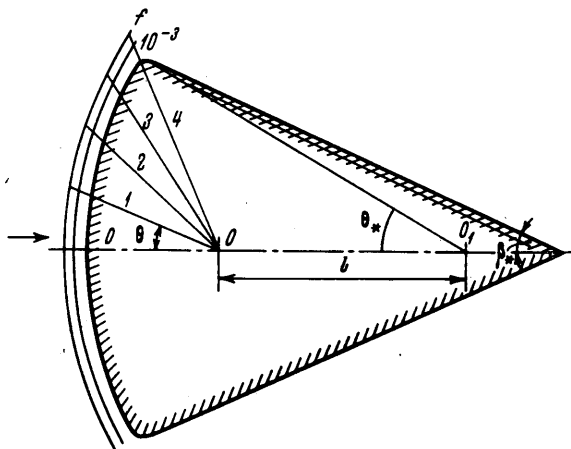
$$(r^2 + l^2 + 2rl \cos \theta)^{n/2} + \left(\frac{1}{\beta_*} \arctg \frac{r \sin \theta}{r \cos \theta + l + l_0} \right)^n = 1 \quad (2.1)$$

$$l_0 = \frac{\sin(\theta_* - \beta_*)}{\sin \beta_*}$$

Контур (2.1) вместе с полярной системой координат с центром в точке O изображен на фиг. 1. Значение угла β_* слабо влияет на контур в лобовой части. Были приняты следующие значения входящих в уравнение (2.1)

параметров: $\theta_* = \beta_* = 30^\circ$, $l = 0,65$. Для большинства расчетов принималось $n = 60$, что соответствует значению минимального радиуса кривизны в месте сопряжения $\delta \approx 0,003 R$.

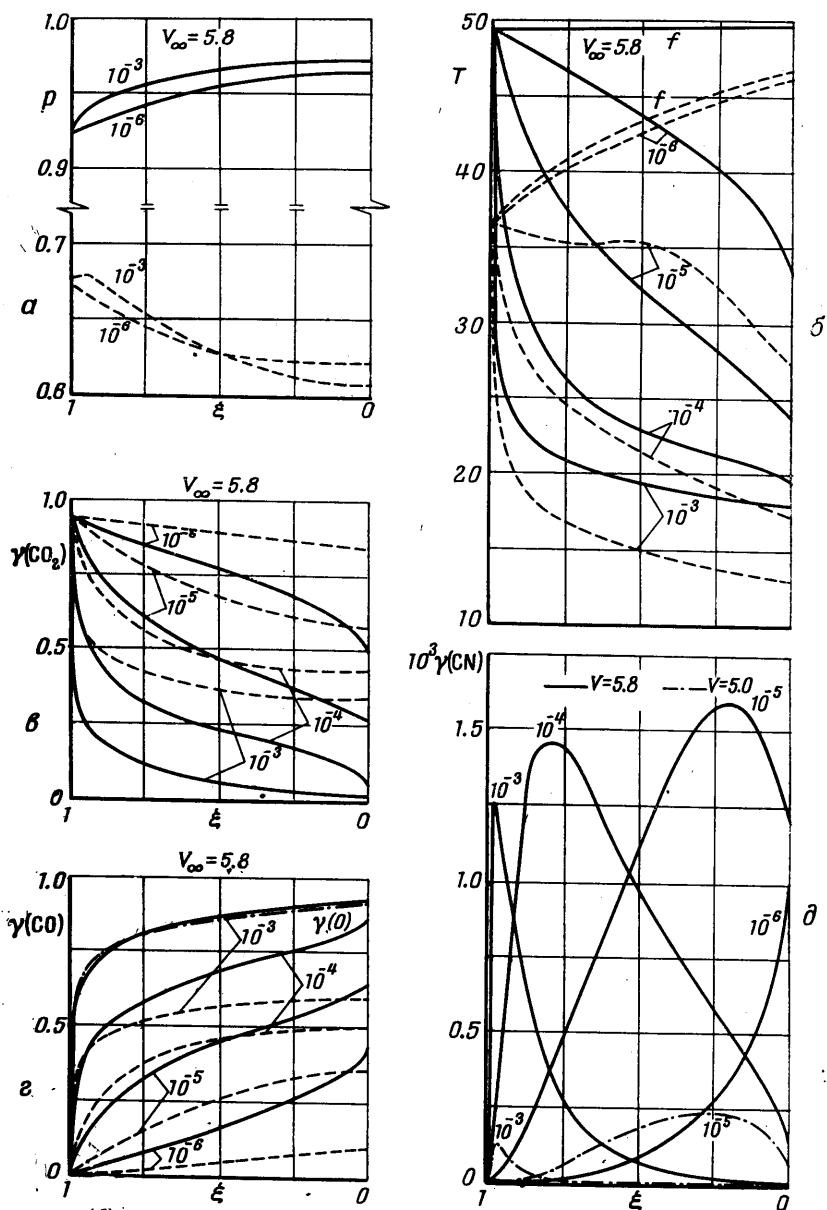
Расчеты обтекания тела, контур которого задается соотношением (2.1), проводились в следующем диапазоне изменения определяющих параметров: $V_\infty = 4 \div 6$ км/сек, $p_\infty = 10^{-6} \div 10^{-3}$ атм, $T_\infty = 250^\circ \text{K}$, $R = 1$ м. Все расчеты проведены для газовой смеси состава $0,94(\text{CO}_2) + 0,05(\text{N}_2) + 0,01(\text{Ar})$, моделирующей атмосферу Венеры.



Фиг. 1

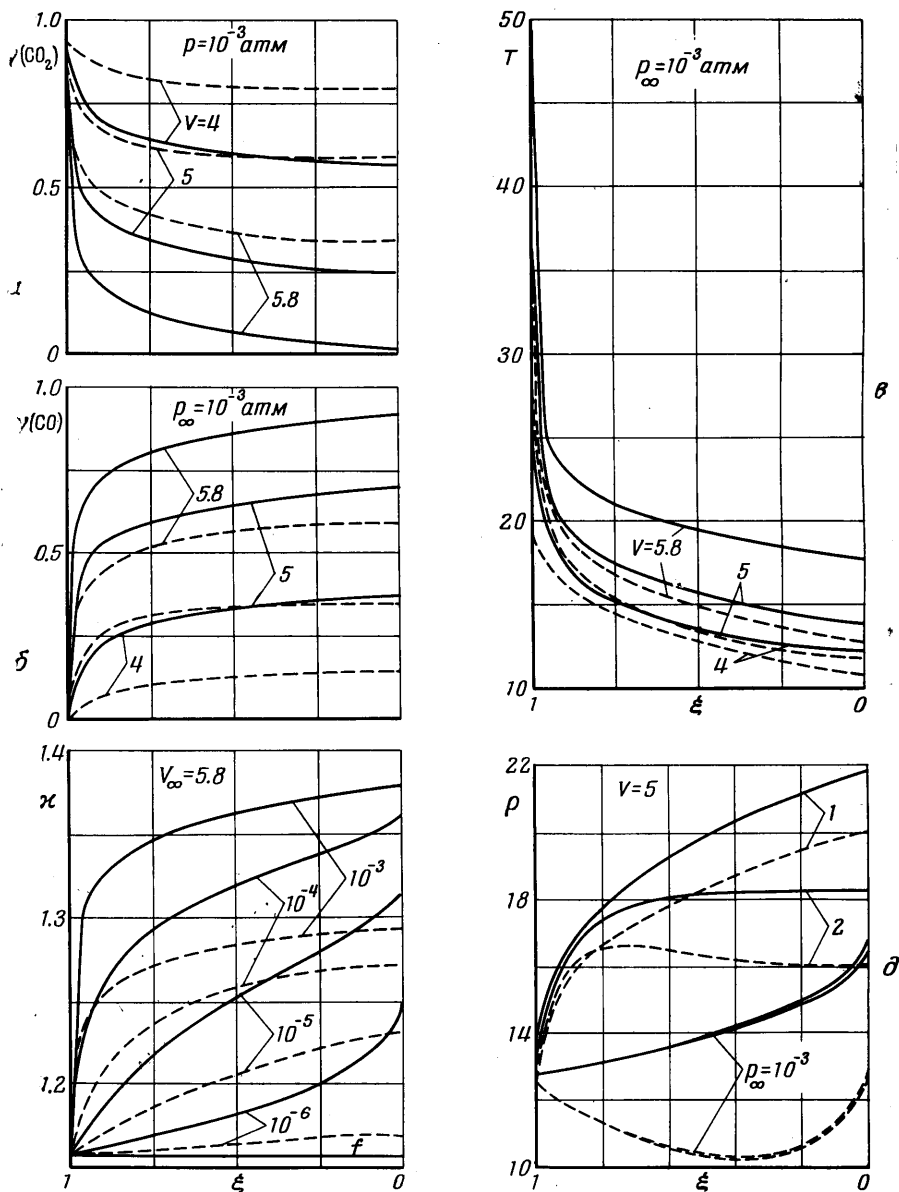
На фиг. 1 показано положение ударной волны перед сегментом при $V_\infty = 5,8$ км/сек для замороженного (f) и околоравновесного ($p_\infty = 10^{-3}$ атм) течений. Вследствие гиперзвукового характера течения толщина ударного слоя на всей лобовой части почти постоянна в обоих случаях. При других значениях давления ударная волна располагается между указанными пределами.

Как и следовало ожидать, с увеличением p_∞ происходит изменение течения от замороженного до равновесного. В качестве иллюстраций приводятся распределения давления (фиг. 2, а), температуры (фиг. 2, б), кон-



Фиг. 2

центратий $\gamma(\text{CO}_2)$, $\gamma(\text{CO})$ (фиг. 2, в, г) и $\gamma(\text{CN})$ (фиг. 2, д) для $V_\infty = 5,8$ км/сек. Сплошные линии соответствуют распределениям от ударной волны до тела вдоль осевой линии тока, штриховые — вдоль луча 4 (фиг. 1). Числа около кривых указывают величину r_∞ в атм. Неравномерность оказывает слабое влияние на давление в ударном слое, в отличие от температуры, испытывающей существенные изменения. На фиг. 2, г нанесено также распределение концентрации атомарного кислорода $\gamma(\text{O})$. Штрихпунктирные линии на фиг. 2, д показывают распределение $\gamma(\text{CN})$ для $V_\infty = 5$ км/сек. Видно, что величина $\gamma(\text{CN})$ сильно зависит от скорости набегающего потока.



Фиг. 3

Для приближенных расчетов сверхзвукового неравновесного течения у боковой поверхности с помощью методики работы [6] важное значение имеет величина отношения «замороженных» теплоемкостей κ_f

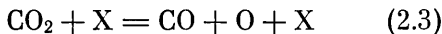
$$\kappa_f = \frac{c_{pf}}{c_{pf} - \mathcal{R}}, \quad c_{pf} = m \sum c_{pi} \gamma_i, \quad c_{pi} = \frac{dh_i}{dT} \quad (2.2)$$

Здесь h_i — молярная энтальпия i -й компоненты. Величина κ_f близка к показателю адиабаты в сверхзвуковом течении на боковой поверхности сегментального тела, если предположить, что в этой области химические реакции заморожены, а внутренние степени свободы находятся в равнове-

сии при поступательной температуре T . Распределение κ_f вдоль оси течения и луча 4 для различных значений p_∞ при $V_\infty = 5,8$ км/сек приведено на фиг. 3, г. В условиях, когда течение в ударном слое близко к равновесному, величина κ_f меняется вдоль луча 4 незначительно, что подтверждает развитый в [6] приближенный подход.

Графики температуры и основных концентраций вдоль оси течения и луча 4 для различных значений скорости набегающего потока V_∞ представлены на фиг. 3, а, б, в. При выбранном значении давления $p_\infty = 10^{-3}$ атм течение в ударном слое близко к равновесному на всем диапазоне V_∞ . Равновесная степень диссоциации CO_2 увеличивается с увеличением V_∞ ; при $V_\infty = 5,8$ км/сек равновесная концентрация CO_2 невелика.

Еще в [1] было отмечено, что для смесей с преобладанием концентрации CO_2 в рассматриваемом диапазоне параметров основной реакцией является реакция диссоциации углекислого газа; скорости остальных реакций (1.1) значительно меньше. Это позволяет предположить упрощенную кинетическую модель химических реакций в смеси, позволяющую уловить основные особенности полей газодинамических параметров, связанные с неравновесными химическими реакциями. Будем считать, что в смеси протекает только одна реакция



Уравнение для $\gamma(\text{CO}_2)$ принимает простой вид

$$v \cdot \text{grad } \gamma(\text{CO}_2) = -\omega \quad (2.4)$$

где ω — скорость реакции (2.3) в направлении слева направо. Условия сохранения числа атомов имеют вид

$$\gamma(\text{CO}_2) + \gamma(\text{CO}) = \gamma_\infty(\text{CO}_2), \quad 2\gamma(\text{CO}_2) + \gamma(\text{CO}) + \gamma(\text{O}) = 2\gamma_\infty(\text{CO}_2) \quad (2.5)$$

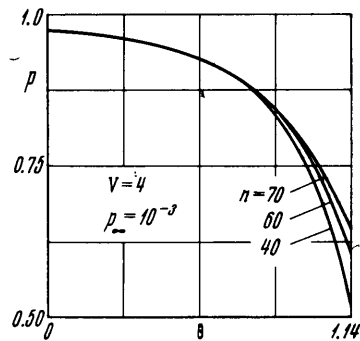
Величина $\gamma(\text{CO}_2)$ находится из (2.4). После этого концентрации CO и O вычисляются из соотношений, вытекающих из (2.5)

$$\gamma(\text{CO}) = \gamma_\infty(\text{CO}_2) - \gamma(\text{CO}_2) \approx 1 - \gamma(\text{CO}_2), \quad \gamma(\text{O}) = \gamma(\text{CO}) \quad (2.6)$$

Концентрации остальных компонент в данной модели равны своим значениям в набегающем потоке. Из графиков на фиг. 2, в, г и фиг. 3, а, б легко убедиться, что соотношения (2.6) выполняются с достаточной точностью.

Закон бинарного подобия для обтекания сегмента проиллюстрирован на фиг. 3, д на примере распределения плотности. Рассмотрены две пары вариантов, соответствующие двум значениям произведения $Rp_\infty = 10^{-1}$ и 10^{-3} (атм·см). Кривые 1 (сплошная линия — вдоль оси, штриховая — вдоль луча 4) рассчитаны при условиях $p_\infty = 10^{-3}$ атм, $R = 100$ см, кривые 2 — при $p_\infty = 10^{-1}$ атм, $R = 1$ см. В обоих вариантах течение достаточно близко к равновесному, поэтому бинарное подобие имеет место лишь в малой окрестности ударной волны. Кривые $\rho(\xi)$ для $Rp_\infty = 10^{-3}$ практически совпадают между собой. Здесь были рассчитаны варианты с $p_\infty = 10^{-5}$ атм, $R = 100$ см и $p_\infty = 10^{-3}$ атм, $R = 1$ см.

На фиг. 4 показана зависимость течения от величины скругления профиля в области миделя на примере распределения давления вдоль поверх-



Фиг. 4

ности тела. Как видно из графиков, при изменении числа n от 70 до 40 давление на поверхности тела вблизи скругления падает на 20%.

Автор благодарит В. П. Стулова за руководство работой.

Институт механики МГУ

Поступило 8 XII 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Стулов В. П., Турчак Л. И. Неравновесные химические реакции в ударном слое при обтекании сферы смесью углекислого газа, азота и аргона. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 5.
2. Авдеевский В. С., Бородин Н. Ф., Кузнецов В. В., Лившиц А. И., Маров М. Я., Михневич В. В., Рождественский М. К., Соколов В. А. Температура, давление и плотность атмосферы Венеры по данным измерений автоматической межпланетной станции «Венера-4». Докл. АН СССР, 1968, т. 179, № 2.
3. Schiffer R. A. Engineering models of the Venus atmosphere based on an interpretation of recent space vehicle observations of Venus. AIAA Paper, 1969, No. 69—51.
4. Стулов В. П., Теленин Г. Ф. Неравновесное обтекание сферы сверхзвуковым потоком воздуха. Изв. АН СССР, Механика, 1965, № 1.
5. Стулов В. П., Турчак Л. И. О сверхзвуковом обтекании затупленных тел при наличии быстрых неравновесных процессов. Изв. АН СССР, МЖГ, 1967, № 5.
6. Лебедев М. Г., Миносцев В. Б., Теленин Г. Ф., Тиняков Г. П. Приближенный метод учета влияния реальности газа при гиперзвуковом обтекании сегментальных тел. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 2.