

## ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Ф. Гордиец, А. И. Осипов и др. УФН, 1972, **108**, 4, 655.
2. Е. Е. Никитин. Теория элементарных атомно-молекулярных процессов в газах. М., «Химия», 1970.
3. Кинетические процессы в газах и плазме. Под ред. А. Хохштива. М., Атомиздат, 1972.
4. L. Landau, E. Teller. Phys. Zs. Sowjetunion, 1936, **10**, 34.
5. Р. Фаулер, Э. Гуггенгейм. Статистическая термодинамика. М., ИЛ, 1949.
6. Е. В. Ступоченко, С. А. Лосев, А. И. Осипов. Релаксационные процессы в ударных волнах. М., «Наука», 1965.
7. R. C. Millikan, D. R. White. J. Chem. Phys., 1963, **39**, 3209.
8. R. L. Taylor, S. Bitterman. Rev. Modern Phys., 1969, **41**, 1, 26.
9. В. Н. Кондратьев. Константы скорости газозафазных реакций. Справочник. М., «Наука», 1970.
10. С. А. Лосев, О. П. Шаталов, М. С. Ялович. Докл. АН СССР, 1970, **195**, 3, 585.
11. М. С. Ялович, С. А. Лосев. Тр. Института механики МГУ, № 18, 1972.
12. I. Hurler. Shock Tube Research. Proc. VIII Intern. Shock Tube Symp., London, 1971.
13. C. W. von Rosenberg, R. Taylor, J. Teare. J. Chem., Phys., 1971, **54**, 5, 1974.
14. В. Н. Макаров, О. П. Шаталов. Изв. АН СССР, МЖГ, 1973, 4.
15. J. R. MacDonald. J. Chem. Phys., 1972, **57**, 2, 1016.
16. P. Hammerling, J. Teare, V. Kivel. Phys. Fluids., 1959, **2**, 4, 422.
17. С. А. Лосев, Н. А. Генералов. Докл. АН СССР, 1961, **141**, 1072.
18. P. V. Marrone, C. E. Treanor. Phys. Fluids, 1963, **6**, 9, 1215.
19. Н. М. Кузнецов. Докл. АН СССР, 1965, **164**, 5, 1097.
20. А. И. Осипов. Теор. и эксп. химия, 1966, **2**, 5, 649.
21. В. Я. Овечкин. Канд. дис., Физический ф-т МГУ, 1971.
22. Н. М. Кузнецов. Теплофиз. выс. темп., 1966, **4**, 282.
23. А. С. Бирюков, Б. Ф. Гордиец, Л. А. Шелепин. Кр. сообщ. физ., 1971, **6**, 13.
24. I. R. Hurler, A. L. Russo, J. G. Hall. J. Chem. Phys., 1964, **40**, 8, 2076.
25. T. I. McLaren, J. Applton. J. Chem. Phys., 1970, **53**, 7, 2850.
26. A. L. Russo. J. Chem. Phys., 1967, **47**, 5001.
27. A. P. Blom, N. H. Pratt. Nature, 1969, **233**, 1052.
28. J. D. Teare, R. L. Taylor, C. W. von Rosenberg. Nature, 1970, **225**, 240.

УДК 533.6.011.55

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГИПЕРЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЗАТУПЛЕННЫХ КОНУСОВ ВЯЗКИМ ГАЗОМ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Ю. П. Головачев, Ф. Д. Попов*  
(Ленинград)

Обтекание затупленных удлиненных тел в условиях входа в атмосферу Земли исследовалось в [1—4]. В этих работах использовалась модель невязкого газа и, следовательно, не определялись значения конвективного теплового потока и напряжения трения на поверхности тела. Ниже рассматривается обтекание сферически затупленных конусов при одновременном учете вязкости, диффузии, теплопроводности и радиационного переноса энергии. Газ считается находящимся в состоянии локального термодинамического равновесия при бинарном характере диффузии в ударном слое. Течение описывается упрощенными уравнениями Навье — Стокса, включающими в себя все члены уравнений движения невязкого газа и уравнений пограничного слоя [5]. В рассматриваемых условиях учет излучения сводится к включению в уравнение энергии дивергенции вектора лучистого теплового потока.

которая находится из уравнения переноса излучения с использованием приближения локально одномерного плоского слоя [6] при нулевых граничных условиях для интенсивности излучения на поверхности тела и на ударной волне.

Область течения ограничена отошедшей ударной волной, осью симметрии, поверхностью тела и некоторым лучом, расположенным на расстоянии шести радиусов затупления от передней критической точки. Краевые условия для газодинамических функций ставятся аналогичными [5].

Термодинамические функции равновесного воздуха и его состав, необходимый для вычисления коэффициента поглощения, находятся с помощью приближенных аналитических зависимостей, предложенных в [7]. Значения коэффициента вязкости и полного коэффициента теплопроводности заимствуются из работы [8]. Коэффициент поглощения рассчитывается с помощью 8-ступенчатой спектральной модели, включающей спектральные линии, непрерывный спектр и молекулярные полосы [3].

Задача решалась методом установления с использованием двухслойной неявной разностной схемы, подробно описанной в работе [5]. Вычисления проводились на расчетной сетке, содержащей 30 лучей, нормальных к поверхности тела, при 26 узлах на луче. Для обеспечения необходимой точности расчетов в пристеночной области применялось сгущение координатных линий к поверхности тела. В качестве примера на рис. 1—4 приведены результаты расчета обтекания сферически затупленного конуса с радиусом затупления 20 см и углом полураствора 30°, летящего со скоростью 12,2 км/с на высоте 61 км. Температура поверхности тела принималась равной 2500° К. Все величины на рисунках безразмерны: линейные размеры отнесены к радиусу затупления,

температура — к  $\frac{m_\infty v_\infty^2}{R}$

( $m_\infty$  — молекулярный вес газа в невозмущенном потоке,  $v_\infty$  — скорость невозмущенного потока,  $R$  — универсальная газовая постоянная), давление — к  $\rho_\infty v_\infty^2$ , тепловые потоки — к  $\rho_\infty v_\infty^3$ . Коэффициент трения определен как отношение напряжения трения на поверхности тела к величине  $\rho_\infty v_\infty^2$ . Сплошными кривыми показаны результаты, полученные с учетом излучения, штриховыми — без учета излучения.

На рис. 1 представлено изменение отхода ударной волны  $\epsilon$ , давления на поверхности тела (1) и давления сразу за ударной волной (2) в зависимости от координаты  $s$ , отсчитываемой от передней критической точки вдоль поверхности тела. Обращает на себя

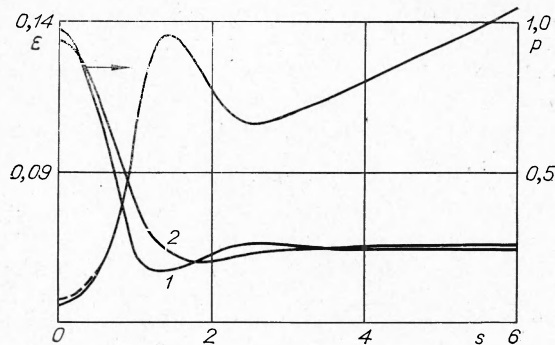


Рис. 1.

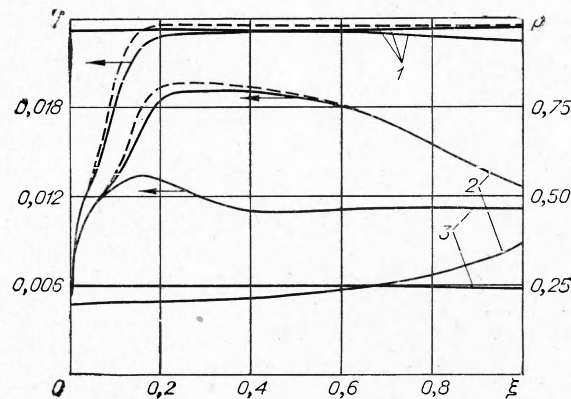


Рис. 2.

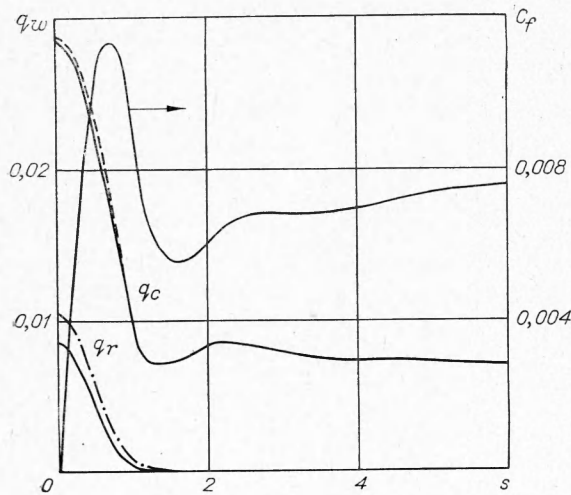


Рис. 3.

ном слое при  $s=0$  и  $1,047$  объясняется резким возрастанием полного коэффициента теплопроводности воздуха в диапазоне условий, соответствующем диссоциации азота.

На рис. 3 показано изменение коэффициента трения ( $C_f$ ) и тепловых потоков вдоль поверхности тела. Коэффициент трения по мере удаления от критической точки изменяется немонотонно. В районе точки сопряжения сферы с конусом он проходит через максимум, а затем через минимум и несколько увеличивается при дальнейшем увеличении  $s$ . Тепловые потоки ( $q_r$  — радиационный,  $q_c$  — конвективный) с удалением от критической точки быстро убывают, приближаясь на боковой поверхности тела к постоянным значениям. На боковой поверхности конуса тепловой поток на единицу площади значительно меньше, чем в критической точке. Однако вследствие увеличения площади поверхности тела он может давать существенный вклад в суммарный нагрев. В рассматриваемых условиях радиационный тепловой поток  $q_r$ , особенно на боковой поверхности конуса, значительно меньше конвективного. Излучение несколько уменьшает конвективный нагрев поверхности тела и не влияет на коэффициент трения. Штрихпунктирной линией на рис. 3 показаны значения лучистого потока, полученные в [4] из решения задачи невязкого обтекания для тех же условий полета при использовании той же спектральной модели коэффициента поглощения, что и в настоящей работе.

Сравнение значений лучистого потока показывает, что поглощение лучистой энергии в пограничном слое заметно (до 20%) снижает радиационный нагрев поверхности тела. Этот вывод подтверждается приведенным на рис. 4 распределением лучистого потока поперек ударного слоя ( $1-s=0$ ,  $2-s=0,349$ ,  $3-s=0,873$ ). Видно экранирующее влияние пограничного слоя на поток излучения к поверхности тела.

Поступила в редакцию  
16/VII 1973

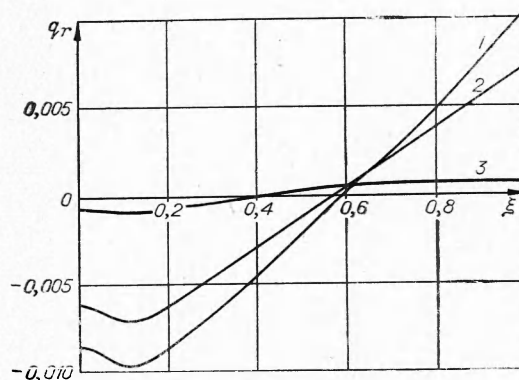


Рис. 4.

внимание весьма немонотонный характер зависимости  $\epsilon(s)$ . На рис. 2 приведены профили температуры и давления на лучах  $s=\text{const}$  в зависимости от нормализованной поперечной координаты  $\xi = r/\epsilon$  ( $1-s=0$ ,  $2-s=1,047$ ,  $3-s=5,061$ ). В рассматриваемых условиях излучение заметно влияет только на профиль температуры. Из рис. 2 видно немонотонное изменение градиента температуры в пристеночной области. Появление минимума температурного градиента в погранич-

## ЛИТЕРАТУРА

1. О. М. Белоцерковский, Л. М. Биберман и др. ТВТ, 1969, 7, 3.
2. В. В. Боголепов, Ю. Г. Елькин. Уч. зап. ЦАГИ, 1971, 2, 2.
3. В. Б. Олстед. Ракетная техника и космонавтика, 1971, 9, 1.
4. Л. Б. Келлис. Ракетная техника и космонавтика, 1971, 9, 4.
5. Ю. П. Головачев, Ф. Д. Попов. ПМТФ, 1972, 5.
6. Бай-Ши-и. Динамика излучающего газа. М., «Мир», 1968.
7. А. Н. Крайко. Инж. ж., 1964, 4, 3.
8. Р. Де Риенцо, А. Д. Пэллоун. Ракетная техника и космонавтика, 1967, 5, 2.

УДК 533.6.011.6

### РЕШЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ О НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНЕ С УЧЕТОМ НЕРАВНОВЕСНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ И ГАЗОФАЗНЫХ РЕАКЦИЙ

*А. М. Гришин, В. И. Зинченко*  
(Томск)

Нестационарный пограничный слой сжимаемого газа исследовался в ряде работ [1—4]. При этом нестационарность в пограничном слое являлась следствием либо малой временной протяженности процессов со времени начала эксперимента, либо объяснялась зависимостью граничных условий от времени.

В данной работе с помощью ЭЦВМ получены решения ряда нестационарных задач пограничного слоя с учетом гомогенных и гетерогенных химических реакций. Для ряда задач расчеты проводились до выхода на стационарный режим протекания процесса, при этом подтвердились аналитически найденные различные режимы горения. Показано, что тепловые потоки в твердое тело в начальные моменты времени могут значительно возрастать. Найдено, что при больших величинах чисел Дамкеллера стационарные режимы могут не реализовываться, а происходит периодический колебательный процесс, обусловленный взаимосвязью механизмов диффузии и теплопроводности, с одной стороны, и протекания гомогенной химической реакции — с другой. Поскольку расчеты проводились при постоянных во времени граничных условиях, нестационарность течения в пограничном слое может быть объяснена протеканием объемных химических реакций.

#### ПОСТАНОВКА СОПРЯЖЕННОЙ ЗАДАЧИ О НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНЕ

Рассмотрим обтекание лобовой критической точки тела вращения, выполненного из углеграфитового материала, четырехкомпонентным потоком газа, состоящим из  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ . Термодинамические параметры этих компонентов будем в дальнейшем отмечать индексами 1, 2, 3, 4 соответственно. Считаем, что на поверхности тела имеют место экзотермическая первичная и эндотермическая вторичная необратимые гетерогенные реакции

