

01;03

## ФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ВОЗДУХОЗАБОРНИКЕ

© А.С.Барышников

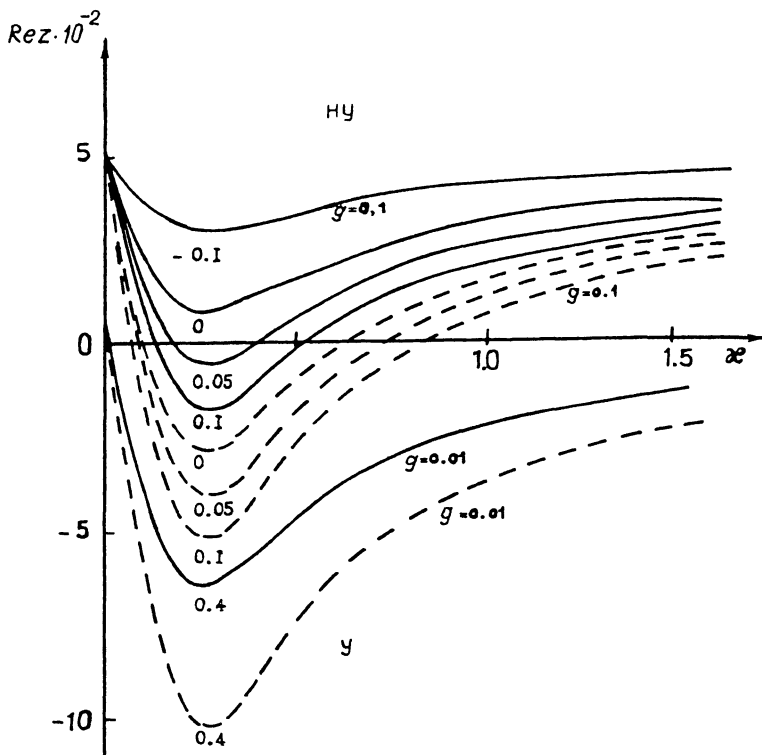
В высоких слоях атмосферы ударная волна (УВ) в горле гиперзвукового воздухозаборника (ГВЗ) не позволяет сжать воздух до нужной степени [1]. Потери уменьшают, создавая систему слабых скачков уплотнения, что увеличивает размеры двигателя, его вес и лобовое сопротивление. Другой способ состоит в деструкции УВ с помощью физико-химических процессов (ФХП) в газе. Для экзотермических ФХП (горения, детонации) этот эффект хорошо известен [2], но горение в ГВЗ не только создаст отрицательный импульс силы тяги, но и снизит эффективность горения в камере сгорания. Наоборот, эндотермические ФХП (диссоциация, ионизация) улучшают характеристики сгорания топлива [3].

В данной работе исследуется совместное влияние трех факторов деструкции УВ, вызванной эндотермическими ФХП [4]: числа Ламкеллера, кривизны линий тока течения и отношения удельных теплоемкостей газа  $\gamma$ . Используется теория устойчивости слабоискривленного, плоскопараллельного слоя течения сжимаемого газа [5]. ФХП моделируются объемным источником тепловыделения (телопоглощения)  $Q$ , а искривленность линий тока — градиентом продольной скорости  $U'$  вдоль поперечной координаты  $Y$ . Задача сводится к одному дифференциальному уравнению:

$$\pi'' = \pi' \frac{2U}{(U-c)} + \pi a^2 \left\{ 1 - \frac{[(U-c)^2 \gamma M^2] [a(U-c)\rho + idQ/dT]}{T[\gamma a(U-c)\rho + idQ/d\rho(1-\gamma)]} \right\}. \quad (1)$$

Здесь возмущение давления  $\Delta P = \pi \exp[ia(X-ct)]$ ;  $T(Y)$ ,  $\rho(Y)$ ,  $P(Y)$  — безразмерные распределения температуры, плотности и давления газа,  $M$  — число Маха,  $i$  — мнимая единица. Решение (1), как и в теории устойчивости пограничного слоя, ищется в виде:  $\pi = \pi_0 \exp(ibY)$ , тогда исследование устойчивости сводится к исследованию корней полинома 4-й степени относительно  $z = -iar(U-c)/(Ks)$ :

$$z^4 + \kappa z^3 + z^2 + [\kappa(1-d)/\gamma + g]z + g\kappa(1-d)/\gamma = 0, \quad (2)$$



Сплошные линии —  $\gamma = 1, 2$ ; Штриховые линии —  $\gamma = 1, 4$ ; числа под кривыми — значения  $d$ .

который зависит от 4 параметров:

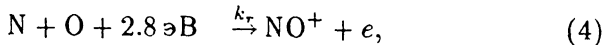
$$d = (\rho dQ/d\rho)/(T dQ/dT), \quad g = 2ab\rho U'/(Ks), \quad \gamma = c_p/c_v,$$

$$\kappa = (dQ/dT)/(Ks), \quad (s^2 = P\rho/M^2; K^2 = a^2 + b^2). \quad (3)$$

Для эндотермических ФХП с нормальной зависимостью скорости реакций от давления и температуры  $\kappa > 0$ ,  $1 > d > 0$ . Для выпуклого течения вблизи горла ГВЗ  $g > 0$ . Расчеты показали, что для средних значений  $\kappa$  существует область устойчивости ( $Rez < 0$ , см. рисунок). Увеличение  $\gamma$  и  $d$  или уменьшение  $g$  приводит к расширению области устойчивости.

Вблизи горла реального ГВЗ [6] число Маха до УВ  $M_0 = 4$ , давление  $P = 0.7 \cdot 10^5$  Па, плотность газа

$\rho = 0.1 \text{ кг/м}^3$ . За УВ давление выше в 16 раз, а плотность — в 6 раз. В случае течения через область тлеющего разряда [7] при тех же значениях давления и плотности температура атомов и ионов  $T_a \approx 10^3 \text{ К}$ , а температура электронов  $T_e \approx 1.2 \cdot 10^4 \text{ К}$ . Судя по оценкам [7], большая доля внутренней энергии в разряде содержится в состоянии  $O_2(a^1\Delta)$ . Наконец, на указанном режиме ионизация идет через процесс ассоциативной ионизации с участием электронно-возбужденных уровней [8]



$$k_r = 0.86 \cdot 10^{12} T^{1/2} \exp(-32645/T) \text{ кг/м}^3 \text{ с.}$$

Для принятых параметров течения можно оценить частотные границы устойчивости УВ в плазме и течения за ней вблизи горла ГВЗ. Считая энергию превращения ФХП  $\Delta Q$  равной разности энергии ассоциативной ионизации  $NO$  и энергии возбуждения  $Q_2(a^1\Delta)$ , получаем  $q = \Delta Q / (R_g T) \approx 22.3$ , и для бинарной реакции  $d \approx 0.1$ . Тогда

$$\kappa \approx 0.036 M \lambda [m], \quad g \approx 1.67 M^2 \lambda / R_k, \quad d \approx 0.1. \quad (7)$$

Радиус кривизны горла ГВЗ в [6]  $R_k = 0.17 \text{ м}$ , поэтому теория слабоискривленного течения применима при  $g \leq 0.01$ , т. к. при этом  $R_k \geq 0.15 \text{ м}$ . Как следует из расчетов, при  $g = 0.01$  неустойчивость возникает при  $\kappa < 0.02$  и при  $\kappa > 10^4$ . Таким образом, высокочастотная граница устойчивости ( $\lambda < 0.05 \text{ м}$ , частота  $f > 8 \text{ кГц}$ ) соответствует началу ультразвукового диапазона в воздухе ( $20 \text{ кГц}$ ). Другая граница соответствует инфразвуковым колебаниям, и инкремент нарастания ( $Re z$ ) для нее растет очень медленно. Наоборот, высокочастотный предел характеризуется резким ростом инкремента и слабой зависимостью от параметров течения, ФХП и свойств газа. Поэтому его можно считать универсальным. Для конкретных ФХП и режимов течения необходимо индивидуально подбирать частотный диапазон и интенсивность ультразвукового воздействия.

### Список литературы

- [1] Курзинер Р.И. Реактивные двигатели для больших сверхзвуковых скоростей полета. М., 1989. 263 с.
- [2] Зельдович Я.Б., Баренблат Г.И., Либрович В.Б., Магвиладзе Г.И. Математическая теория горения и взрыва. М., 1980. 478 с.
- [3] Паушкин Я.М. Жидкие и твердые химические ракетные топлива. М., 1978. 192 с.
- [4] Барышников А.С., Бедин А.П., Масленников В.Г., Мишин Г.И. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 5. С. 281–284.

- [5] Гапонов С.А., Маслов А.А. Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск, 1980. 144 с.
- [6] *Etami S., Rodi P.E., Trexler C.A., Beaulieu W.* // AIAA Paper. 1995. 95-0037.
- [7] Акишев Ю.С., Дерюгин А.А., Напартович В.Б., Кочетов И.В., Напартович А.П., Трушкин Н.И. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 6. С. 571-584.
- [8] Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике / Под ред. Г.И. Майкапара. М., 1972. 344 с.

Физико-технический  
институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
С.-Петербург

Поступило в Редакцию  
14 мая 1996 г.

