

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ГИПЕРЗВУКОВОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Цель работы – разработать подход к задаче определение параметров плазменных образований вблизи поверхности гиперзвукового летательного аппарата и предложить метод решения данной задачи, который мог бы быть использован в качестве оценочного при проведении экспериментов и служить первым приближением в дальнейших работах.

Существующие более точные методы расчета позволяют извлекать информацию о плазме с гораздо большей точностью. Но применение таких методов, как правило, связано со значительной вычислительной работой. Во многих случаях определение температуры (или плотности) нейтральной компоненты плазмы с очень высокой точностью практически невозможно из-за колебаний самих параметров плазмы. Поэтому простые оценки могут оказаться в такой ситуации полезными.

Подробное аналитическое рассмотрение процесса формирования и прохождения ударной волны через пространственную неоднородность проведено в работе [1] в одномерном приближении. Из результатов работы [1] следует система уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial x(t)}{\partial t} &= a(x(t)) + a_0 \frac{f_2(x(t))}{2}, \\ \frac{\partial(f_2(x(t)))}{\partial t} &= \frac{a_0 f_2(x(t))}{2a(x(t))} \end{aligned} \quad (1)$$

где x - пространственная координата, t – время, $f_2(t)$ - функция, описывающая начальную форму возмущения ударной волны [1]. Если пространственная неоднородность обусловлена неравномерным распределением температуры (или плотности) при постоянном давлении), то $a(x) = a(T(x)) = \sqrt{\gamma RT(x)}$ - скорость звука в точке x , R - газовая постоянная, $a_0 = a(T_0) = const$, T_0 - постоянная температура вне области пространственной неоднородности, $T(x)$ - распределение температуры, определяющее форму пространственной неоднородности. Из системы (1) было выведено приближенное уравнение для скорости ударной волны в плазменной неоднородности:

$$V(x, x_0, M_0, a_0, T) \approx a(T(x)) + a_0 F(x, x_0, M_0) \quad (2)$$

Из уравнения (2) может быть получена простая приближенная формула для вычисления температуры плазмы по данным о времени прохождения ударной волны между двух произвольных точек внутри плазменной неоднородности. В общем случае время, за которое ударная волна проходит расстояние между двумя точками регистрации (от x_b до x_e), определяется формулой

$$t_{be} = \int_{x_b}^{x_e} \frac{dx}{V(x)} \quad (3)$$

Итоговое же выражение для расчета температуры плазменной неоднородности принимает вид:

$$T(t_{be}, M_p) \approx T_0 \frac{\tau^4}{4 \left[\tau - \eta_{be} + \sqrt{(\tau - \eta_{be})^2 - \frac{t_{be}}{\sqrt{t_x t_b}} \tau^2} \right]^2}, \quad (4)$$

Для проверки точности было проведено сравнение результатов вычислений с использованием приближенного выражения (4) и численным решением. При начальном числе Маха равным 6 и максимальной температуре 1500 К максимальное отклонение составило 3.1%. Таким образом, приближенная формула удовлетворяет требованиям по точности. Максимальному отклонению 5% соответствует начальное число Маха равное 10,5 и максимальная температура 2000 К.

Также был рассчитан эксперимент Д.Ван Ви [2]. В этих работах с помощью двух лазеров регистрировалось время прохождения ударной волны между двумя точками регистрации. Измерения проводились в воздухе при давлениях 1.6 и 10 Тор. Ударная волна проходила через плазму газового разряда, причем направление прилагаемого электрического поля было перпендикулярно направлению распространения ударной волны. Результаты показали, что выражение (4) отличается от полученных экспериментально значений не более чем на 3%.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Sukhomlinov V.S., Kolosov V.Y., Sheverev V.A., Otugen M.V. Formation and Propagation of a Weak Shock Wave in a Gas Temperature Gradient// AIAA 99-4943, 9th International Space Plane and Hypersonic Systems and Technologies Con. Norfolk, 1999.
2. Van Wie D.M., Gauthier L.R. Труды II симпозиума «Термохимические процессы в плазменной аэродинамике», СПб, 2001, 130 с.