

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ В
РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПЛАЗМЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

В работе приведены результаты использования экспериментальных измерений проводимости плазмы продуктов сгорания ракетного двигателя для определения в реальном времени распределения температуры по длине камеры сгорания.

Описание плазмы продуктов сгорания ведется в рамках трехжидкостной модели плазмы [1,2]. Путем линеаризации уравнений для скорости электронной компоненты плазмы и степень ионизации, удастся построить простую процедуру определения температуры в точке измерения проводимости плазмы.

Уравнение для степени ионизации решается в аналитическом виде и дает формулу для оценки степени ионизации при заданном распределении скорости

$$\alpha = \alpha_0 e^\theta = \alpha_0 \exp \left\{ \int_0^\tau \left[\pi c \left(\frac{3}{2} + V_0 \right) (\cos(2\pi\tau') \cos(2\pi\sigma) - u_e(\tau', \sigma) \sin(2\pi\tau') \sin(2\pi\sigma)) + \frac{1}{2} \frac{\partial u_e(\tau', \sigma)}{\partial x} \right] d\tau' \right\} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg}(\pi x) \exp \left(\frac{k_4}{2k_1} (\cos(2\pi\tau) - \cos(2\pi\tau')) \right) \right], k_1 = Q_{ea} \sqrt{\frac{8}{\pi k m_e}} \frac{p_0}{f_0 \sqrt{T_0}} = 6.75 \cdot 10^7 \frac{p_0}{f_0 \sqrt{T_0}}, \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{e^2}{\varepsilon_0 k m_e f_0^2 T_0} = 2.3052 \cdot 10^{26} \frac{p_0}{f_0^2 T_0}, k_3 = \frac{k}{\gamma R_{gas} m_e} = 3.772 \cdot 10^4, k_4 = 2\pi c k_3 \left(\frac{5}{2} + \frac{V_0}{g} \right), k_6 = 2\pi c \left(\frac{3}{2} + V_0 \right).$$

где f и n_1 - частота и номер гармоники, c - амплитуда возмущающего акустического сигнала, $a_0 = \sqrt{\gamma R_{gas} T_0}$ - скорость звука, R_{gas} - газовая постоянная продуктов сгорания, $\gamma = c_p / c_v$ - отношение теплоемкостей, X и t - расстояние и время. Исходную систему уравнений [1,2] удастся свести к системе трех уравнений относительно степени ионизации α и уравнений для скоростей ионов и электронов (введены безразмерные переменные $x = X f_0 / \sqrt{\gamma R_{gas} T_0}$, $\tau = t f_0$), p_0 - давление, T_0 - температура, V_0 - потенциал ионизации продуктов сгорания.

Если линеаризовать уравнение для скорости электронов U_e , то относительная скорость $u_e = U_e / a_0$ должна удовлетворять приближенному линейному уравнению

$$\frac{\partial u_e}{\partial \tau} + \frac{k_5}{k_1} \sin(2\pi\tau) \sin(2\pi x) \frac{\partial u_e}{\partial x} + k_1 \sqrt{g} u_e - k_3 g \frac{\partial \varphi}{\partial x} - k_4 \sin(2\pi\tau) \sin(2\pi x) - k_2 \int_0^x (\alpha + \alpha_s - \frac{s}{\alpha}) dx = 0 \quad (3)$$

которое решается аналитически и дает для относительной скорости электронов (числа Маха)

$$u_e(t, x) = \frac{U_e(t, x)}{a_0} = \int_0^t e^{-k_1(t-\tau')} \left[k_3 g \frac{\partial \varphi}{\partial x} + k_4 \sin(2\pi\tau') \sin(2\pi x) + k_2 \int_0^x (\alpha + \alpha_s - \frac{s}{\alpha}) dx \right] d\tau' \quad (4)$$

$$z = \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left[\operatorname{tg}(\pi x) \exp \left(\frac{k_5}{k_1} (\cos(2\pi t) - \cos(2\pi\tau')) \right) \right] \quad (5)$$

Полученные формулы могут быть использованы, в первую очередь, для расчета параметров плазмы продуктов сгорания при известном давлении, температуре, потенциале ионизации и амплитуде модуляции акустического сигнала. Также возможно рассчитать

плотность тока, проводимости плазмы продуктов сгорания и подвижности электронов. Все эти величины являются функциями не только от времени и координаты, но и от давления, температуры, потенциала ионизации и амплитуды модуляции акустического сигнала. Наиболее существенной для проводимости плазмы является зависимость от давления и температуры, поэтому возможно использовать экспериментально полученные результаты измерения проводимости $\sigma_{эксп}$ для определения температуры, считая, что расчетная проводимость является функцией только температуры и известного давления.

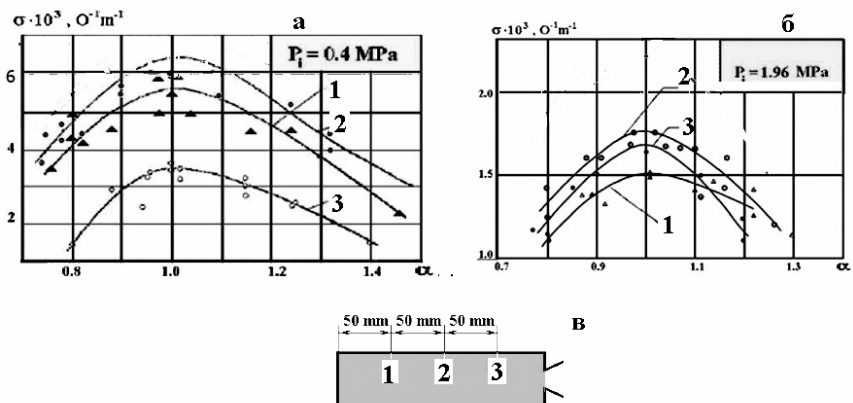


Рис. 1. Зависимость проводимости плазмы продуктов сгорания от коэффициента избытка окислителя α при давлениях 0.4 МПа (а) и 1.96 МПа (б), измеренная в трех сечениях камеры сгорания (в)

Проводимость плазмы продуктов сгорания определялась экспериментально в трех сечениях цилиндрической камеры сгорания (рис. 1в). Сечение 1 отстояло от начала камеры сгорания на 50 см, сечение 2 - на 100 см, сечение 3 - на 150 см. Все расчеты проводились при потенциале ионизации $V = 7.5$ эВ. Часть результата представлена на рис. 2. Реальная точность определения проводимости в данном эксперименте (7-10%) позволяет считать, что значения температуры, полученные разными методами, практически совпадают, поэтому метод может быть использован для определения в реальном времени распределения температуры, подвижности электронов и других параметров в различных участках КС.

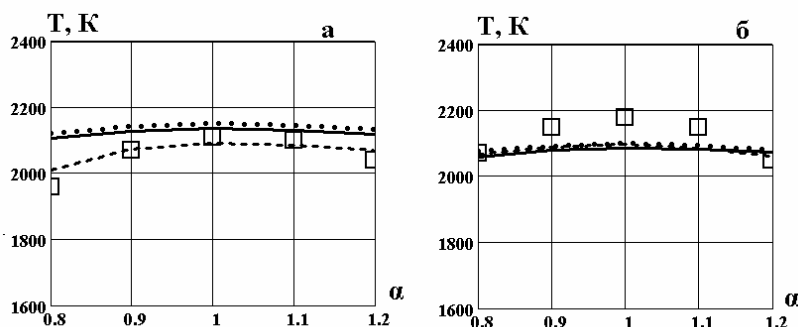


Рис. 2. Зависимость температуры от коэффициента избытка окислителя α , рассчитанная по проводимости: сплошная линия - в сечении 1, точечная линия - в сечении 2, пунктирная линия - в сечении 3; точки - экспериментальные данные при давлении 0.4 МПа (а) и 1.96 МПа (б)

ЛИТЕРАТУРА:

1. Пинчук В.А. Инж.-физ.журн. 1994, т.67, №1-2, с. 112-118.
2. Куранов А.Л., Кучинский В.В., Пинчук В.А., Филимонов Ю.Н. Поле, 2005, № 3, с.28-34.