

УДК 629.78.05

М.М. ХРУСТАЛЁВ, Н.В. ЛЮБИНСКАЯ

Федеральное государственное научное учреждение «Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики», Москва, Россия

КВАЗИОДНОМЕРНАЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСКОРЕНИЯ ПЛАЗМЫ В АИПД МАЛОЙ ТЯГИ

Рассмотрена квазиодномерная физико-математическая модель АИПД малой тяги, описывающая положения и скорости центра масс сгустка, условного размера сгустка в направлении его движения, его среднюю плотность и температуру, и содержащая соотношения, учитывающие физические процессы, такие как излучение плазмы, поглощение энергии излучения рабочим телом, ионизация плазмы и потеря энергии на ионизацию, разогрев плазменного сгустка за счет энергии электромагнитного поля и др.

плазма, абляционный импульсный плазменный двигатель, физико-математическая модель, характеристики, физические процессы

В последнее время всё больше и больше находят свое применение малые космические аппараты (МКА) с массой от 10 до 100 кг. Заинтересованность разных отраслей в этой области, требует развития малогабаритных двигательных установок для регулярной коррекции орбит, способных эффективно работать в условиях ограниченного потребления мощности.

Пожалуй, одним из перспективных ДУ для подобных условий мог бы быть абляционный импульсный плазменный двигатель, основные достоинства которого заключаются в простоте конструкции, малой стоимости и надежности.

В связи с тем, что в НИИ ПМЭ был разработан ряд физико-математических моделей для абляционных импульсных двигателей, было принято решение продолжать эти работы уже для микро АИПД.

Была рассмотрена модель коаксиального АИПД, разрядный канал которого представляет собой два соосных металлических электрода, к которым подводится питающее напряжение от конденсаторного накопителя энергии. Тефлон, в качестве рабочего тела, подается с торца этой коаксиальной конструкции. Предполагается, что задана малая начальная масса сгустка. Плазменный сгусток ускоряется в

канале за счет газодинамических и электромагнитных сил, и его масса пополняется за счет абляции тефлонового блока в результате поглощения тефлоном энергии излучения плазмы.

Уравнения движения центра масс плазменного сгустка (ПС) и изменения массы ПС имеют вид

$$\frac{dm_c}{dt} = \Pi_a^\Sigma; \quad \frac{dx_c}{dt} = V_c; \quad (1, 2)$$

$$m_c \frac{dV_c}{dt} + \Pi_a^\Sigma = F_P + F_H + F_{mp}, \quad (3)$$

где m_c – масса ПС; Π_a^Σ – скорость пополнения массы ПС за счет абляции тефлоновых блоков; x_c – положение центра масс ПС вдоль оси x ; V_c – скорость движения ПС; F_P – сила, обусловленная гидростатическим давлением; F_H – электромагнитная сила; F_{mp} – сила трения.

Уравнения деформации (разлета) плазменного сгустка (ПС) имеют вид

$$\frac{d\delta}{dt} = V_\delta; \quad (4)$$

$$\frac{dV_\delta}{dt} = -\Pi_a^\Sigma \cdot V_\delta + 4F_P^\delta + 4F_H^\delta + 4F_{mp}^\delta, \quad (5)$$

где δ – ширина ПС; V_δ – скорость расширения (сжатия) ПС.

Температура ПС описывается уравнением

$$\begin{aligned} (c_v + \xi^1) \cdot m_c \frac{dT_c}{dt} = R_c \cdot j_\Sigma^2 + \\ + \frac{1}{2} \Pi_a^\Sigma \cdot V_c^2 - \frac{k \cdot (1 + \xi) \cdot m_c \cdot V_\delta}{m_a \cdot \delta} T_c - \\ - c_V \Pi_a^\Sigma \cdot (T_c - T_{a\delta}) - q_{au}^c - \\ - q_{uz}^c + k_{mp} \cdot F_{mp} V_c, \end{aligned} \quad (6)$$

где ξ^1 – изменение теплоемкости ПС за счет изменения степени ионизации; R_c – активное сопротивление ПС; $T_{a\delta}$ – температура абляции; q_{au}^c – расход энергии на ионизацию аблировавшей массы; q_{uz}^c – расход энергии на излучение ПС.

Уравнения электрической цепи имеют вид:

$$C_n \frac{dU_n}{dt} = - \cdot j_\Sigma; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} (L_u + L_K(x_c)) \frac{dj_\Sigma}{dt} = U_n - R_u \cdot j_\Sigma - \\ - R_c \cdot j_\Sigma - L'_K j_\Sigma V_C, \end{aligned} \quad (8)$$

где U_n – напряжение на клеммах емкостного накопителя энергии; C_n – емкость накопителя; R_u – сопротивление электрической цепи (за исключением ПС); U_{nl} – падение напряжения на ПС; L_u – индуктивность цепи,

Давление в плазменном сгустке вычисляется из уравнения состояния

$$p_c = k \cdot (1 + \xi) \cdot \frac{\rho_{cp}}{m_a} \cdot T_c. \quad (9)$$

Затраты энергии на ионизацию q_{au}^c , ионизация ПС ξ , количество нейтральных атомов N_a , ионов N_i и электронов N_e в плазме подсчитываются исходя из модели Саха.

Излучение плазмы, поглощение излучения тефлоновыми блоками и абляция описываются следующими уравнениями:

$$q_{uz}^c = 4 \sigma_{bl} \cdot \alpha_{uz} \cdot \frac{m_c}{m_a} \cdot T_{cp}^4, \quad (10)$$

где σ_{bl} – коэффициент излучения абсолютно черного тела; α_{uz} – степень черноты ПС.

Суммарная аблировавшая масса в единицу времени:

$$M_a = c_a \cdot \eta_{a\delta}, \quad (11)$$

где c_a – коэффициент абляции;

$$\eta_{a\delta} = \frac{1}{4\pi} q_{uz}^c \gamma(x_c, r_1, r_2); \quad (12)$$

коэффициент γ задает долю излучения падающую на поверхность тефлонового блока.

$$\Pi_a^\Sigma = \begin{cases} M_a, & F_\delta \geq 2m_c \frac{dV_c}{dt}; \\ 0, & F_\delta < 2m_c \frac{dV_c}{dt}. \end{cases} \quad (13)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} m_c(t_0); \quad x_c(t_0) = x_0; \quad V_c(t_0) = 0; \\ \delta(t_0); \quad V_\delta(t_0) = 0; \quad T_c(t_0); \quad U_n(t_0); \quad j_\Sigma(t_0) \end{aligned}$$

считаются заданными.

Модель реализована в компьютерной системе аналитических вычислений Maple 9.5.

Проведенные численные эксперименты подтвердили работоспособность модели на качественном уровне.

Поступило в редакцию 19.05.2006

Рецензент: канд. техн. наук. Е.М. Петров, Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики, Москва.