

А.А. СТЕПАНЕНКО, Я.А. ЛЕОНОВ, И.Д. ЕГОРОВ, Е.В. СТЕПИН

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

УСКОРЕНИЕ ПЛАЗМЫ В КАНАЛЕ АБЛЯЦИОННОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ VERA

Представлена модель ускорения плазмы в канале абляционного импульсного плазменного двигателя VERA, разрабатываемого в ООО «СТАР», НИЯУ МИФИ. Исследована временная динамика плотности, температуры, скорости истечения, состава плазмы двигателя, определены массовый расход рабочего вещества и средняя тяга ускорителя за импульс. Рассмотрено влияние инженерных параметров двигателя, таких как длина и радиус ускорительного канала, параметры электроразрядной системы, на характеристики его работы. Данные модели сравниваются с данными экспериментальных измерений плотности и температуры плазмы на выходе из сопла двигателя.

A.A. STEPANENKO, Y.A. LEONOV, I.D. EGOROV, E.V. STEPIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

PLASMA ACCELERATION IN THE CHANNEL OF THE ABLATIVE PULSED PLASMA THRUSTER VERA

A model of plasma acceleration in the VERA ablative pulsed plasma thruster channel, developed at STAR LLC, National Research Nuclear University MEPhI, is presented. The temporal dynamics of the thruster's plasma density, temperature, exhaust velocity, and composition are analyzed, and the working fluid mass flow rate and average thrust of the thruster are determined. The influence of engine engineering parameters, such as the length and radius of the acceleration channel and the parameters of the electric discharge system, on its operating characteristics is examined. The model data are compared with experimental measurements of the plasma density and temperature at the engine nozzle exit.

Технология CubeSat используется для массового развертывания флота малых и сверхмалых космических аппаратов (КА) [1]. Решение проблемы корректировки орбиты подобных КА, в т.ч. для их последующей утилизации при завершении цикла работы, требует оснащения спутников компактными двигательными установками [2].

Одним из возможных подходов к реализации подобного ускорителя является схема абляционного импульсного плазменного двигателя (АИПД) [3-5]. На базе ООО «СТАР», НИЯУ МИФИ, разрабатывается АИПД VERA –гибридная двигательная установка, сочетающая в себе классическую схему аксиально-симметричного ускорителя и магнитное сопло [6].

Для описания АИПД был разработан ряд физических и инженерных моделей, позволяющих как описывать процессы переноса плазмы в ускорительном канале двигателя, так и предсказывать его рабочие характеристики [7, 8]. В работе представлена модель ускорения плазмы в канале АИПД VERA, сочетающая в себе описание процессов в объеме и на границе ускорительного канала двигателя, а также электротехническую модель ускорителя. С использованием модели выполнено численное исследование временной динамики плотности, температуры, скорости истечения и состава плазмы двигателя, а также определены массовый расход рабочего вещества и средняя тяга ускорителя за импульс. Продемонстрировано, что одним из ключевых процессов, определяющих процесс нагрева и испарения рабочего вещества двигателя, является близкое к равновесному излучение плазмы, приводящее к формированию характерных зависимостей плотности заряженных компонентов плазмы от времени. Выполнено сравнение расчетных данных с имеющимися экспериментальными данными по плотности и температуре плазмы на выходе из сопла двигателя [9].

Наряду с исследованием процессов абляции рабочего вещества, образования и ускорения плазмы, изучено влияние инженерных параметров двигателя, таких как длина и радиус ускорительного канала, параметры электроразрядной системы, на рабочие характеристики двигателя. Показано, что в пространстве параметров работы ускорителя имеется область оптимальных значений, обеспечивающих, в частности, максимизацию средней тяги и удельного импульса двигателя.

Список литературы

1. Villela T. et al. // Int. J. Aerospace Eng. 2019. V. 2019. №. 1. P. 5063145.
2. Pascoa J. C., Teixeira O., Filipe G. // Am. Soc. Mech. Eng. 2018. V. 52002. P. V001T03A039.
3. Zhang Z. et al. // Rev. Mod. Plasma Phys. 2019. V. 3. №. 1. P. 5.
4. Любинская Н. В. Абляционный импульсный плазменный двигатель для перспективных малоразмерных космических аппаратов : дис. – Московский авиационный институт, 2020.
5. Гордеев С. В. и др. // Вестник МАИ. 2024. Т. 31. № 4. С. 177-184.
6. Егоров И. Д., Стёпин Е. В. // XLIX Академические чтения по космонавтике, Москва. 2025. Т. 28. С. 178-179.
7. Koizumi H. et al. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. №. 3. P. 033506.
8. Huang T. et al. // Acta Astronautica. 2020. V. 173. P. 69-75.
9. Леонов Я.А., Егоров И.Д., Степаненко А.А. Определение радиального распределения электронной температуры плазмы абляционного импульсного плазменного двигателя методом оптической эмиссионной спектроскопии // Сборник материалов конференции ЛаПлаз. 2026.