

УДК 621.3

Ионные двигатели

Ерёменко М.А., Адинцова Я.П.

Научный руководитель – к.т.н., доцент ЕЖОВ В.Д.

Концепция ионного двигателя была выдвинута в 1917 году Робертом Годдардом, а в 1954 году Эрнст Штулингер детально описал эту технологию, сопроводив её необходимыми вычислениями.

Ионный двигатель является зрелой электрической двигательной установкой, разработка которой началась в 1960-х годах. Ионные двигатели – это быстро развивающаяся исследовательская область. Главная особенность ионного двигателя состоит в том, что процесс ионизации топлива и процесс ускорения ионов физически разделены, в отличие от других электрических двигателей, таких как двигатели Холла. Независимо от типа двигателя, процесс ускорения ионов состоит из извлечения ионов из разрядной камеры посредством мульти-диафрагмы узла сетки, называемого ионной оптикой или сетками ионных двигателей.

Ионные двигатели характеризуются электростатическим ускорением ионов, извлеченных из источника плазмы.

Ускоритель ионов состоит из электрически смещенных мульти-диафрагменных сеток, обычно двух или трех, которые называются ионной оптикой.

Первая сетка, контактирующая с плазмой в разрядной камере, называется сеткой экрана, вторая называется сеткой ускорителя, а третья, используемая в некоторых двигателях, называется сеткой замедлителя.

Ионная оптика характеризуется рядом геометрических и электрических параметров: внешний диаметр сетки (D), активному диаметру сетки или диаметру пучка (D_{ac}), толщина сетки экрана (t_s), толщина ускоряющей сетки (t_y), и многими другими.

Есть также некоторые параметры, которые можно использовать для оценки качества сеток:

Нормализованная проницаемость на отверстие – это величина тока, которую единичная диафрагма может извлечь и сфокусировать. Нормализованная проницаемость на отверстие измеряет способность извлечения данной диафрагмы.

Расходимость пучка – это то, насколько расширяется плазменный пучок после фокусировки, и его можно охарактеризовать углом расхождения. Угол расхождения также может быть определен для пучка, сфокусированного одной апертурой.

Расхождение луча должно быть минимизировано, чтобы уменьшить потери тяги и избежать воздействия шлейфа на космический аппарат. Для двухскоростных систем ускорения различные эксперименты давали значения угла расхождения приблизительно от 10° до 25° .

Неоднородность профиля плотности тока может быть описана параметром плоскостности пучка, который определяется как отношение средней к максимальной плотности тока пучка.

Проблемы с ионной оптикой можно разделить на три категории: проблемы с запуском, проблемы с работой и эрозия распыления.

Потенциальные проблемы связаны с вибрациями запуска, которые могут привести к пластической деформации, контакту сетки с сеткой и смещению диафрагмы. Чтобы предотвратить эти проблемы, ионная оптика подвергается испытаниям на случайную вибрацию при тестовых полетах по трем осям, как изолированные, так и установленные на двигателе, чтобы проверить конструкцию и доказать, что вызванные вибрацией напряжения не будут превышать предельное напряжение упругости, что разрыв сетки и выравнивание отверстий не будут изменены.

Оптика ионного двигателя работает при высоких напряжениях и повышенных температурах, что приводит к тепловому отклику, электростатическому давлению и помехам в магнитной цепи разрядной камеры. Хотя электростатическое давление не является реальной

проблемой, и магнитные помехи решаются путем построения сеток с диамагнитным или слабо парамагнитным материалом, тепловое расширение решеток может создавать проблемы.

Критическим режимом отказа является эрозия распылением поверхностей сетки. Это происходит очень медленно, за несколько десятков тысяч часов до того, как это может привести к неисправности ионного двигателя. Испытания на износ на ионном двигателе показали, что отказ двигателя происходит из-за разрушения материала от ускоряющей решетки до точки структурного разрушения. Этот тип отказа происходит в результате образования ионов на выходе или ниже по течению сеток в ионном пучке, которые движутся вверх по течению. Эти ионы ударяются о решетку ускорения и разрушают ее в процессе эрозии распыления.

После летних испытаний в 1960-х годах ионные двигатели сыграли важную роль в работе многих космических аппаратов. Ионная оптика, как важнейший компонент двигателей, развивалась во многих аспектах с целью увеличения срока службы двигателя. После провала SERT I в 1964 году, SERT II, на котором была установлена молибденовая ионная оптика, был успешно запущен и испытан в космосе в 1970 году.

Для многих фраза «Включаем ионный двигатель» может показаться скорее пришедшей из какого-нибудь фантастического фильма, вроде «Звездных войн», нежели относящейся к реальному миру. А ведь ионные двигатели на самом деле используются в различных космических миссиях уже более сорока лет, и они по-прежнему продолжают оставаться объектом активных исследований со стороны ученых.

Литература

1. A. I. Morozov and V. V. Savelyev, "Fundamentals of stationary plasma thruster theory, " in *Reviews of Plasma Physics*, edited by B. B. Kadomtsev and V. D. Shafranov (Kluwer, Dordrecht, 2000), Vol. 21.
2. Морозов А. И. Физические основы космических электрореактивных двигателей. — М.: Атомиздат, 1978. — 328 с.