

Марков В.Е.,

студент

5 курс, факультет «Ракетно-космической техники»

БГТУ «Военмех»

Россия, г. Санкт-Петербург

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Аннотация: В статье рассматриваются конструктивные особенности, физические принципы работы и области применения стационарных плазменных двигателей (СПД) как одного из наиболее перспективных типов электрореактивных двигательных установок. Проведен анализ преимуществ СПД перед химическими двигателями, включая высокий удельный импульс (до 3000 с), экономию массы рабочего тела и возможность длительной эксплуатации. Описаны ключевые компоненты двигателя, включая разрядную камеру, магнитную систему и катод-нейтрализатор. Выявлены основные сферы практического использования: коррекция орбит геостационарных спутников, межпланетные миссии, деорбитинг космических объектов и оснащение малых космических аппаратов. Приведены примеры успешной эксплуатации СПД-100 и СПД-140 на российских и зарубежных спутниках. Сделан вывод о стратегической значимости развития СПД-технологий для устойчивого освоения космоса.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, электрореактивная двигательная установка, удельный импульс, ионизация, ксенон, коррекция орбиты, космический аппарат, деорбитинг.

Annotation: The paper examines the design features, physical operating principles, and application areas of stationary plasma thrusters (SPTs) as one of the most promising types of electric propulsion systems. An analysis is made of the

advantages of SPTs over chemical engines, including high specific impulse (up to 3000 s), propellant mass savings, and long-duration operation capability. The key components of the thruster, such as the discharge chamber, magnetic system, and neutralizer cathode, are described. The main practical applications are identified: orbit correction of geostationary satellites, interplanetary missions, deorbiting of space objects, and equipping small spacecraft. Examples of successful operation of SPT-100 and SPT-140 on Russian and foreign satellites are given. A conclusion is drawn about the strategic importance of developing SPT technologies for sustainable space exploration.

Key words: *stationary plasma thruster, electric propulsion system, specific impulse, ionization, xenon, orbit correction, spacecraft, deorbiting.*

Развитие космической техники на современном этапе характеризуется переходом к более экономичным и энергоэффективным системам движения. Традиционные химические двигатели, несмотря на высокую тягу, имеют ограниченный удельный импульс (как правило, не более 450 с), что приводит к значительному расходу топлива при длительных миссиях. Альтернативой выступают электрореактивные двигатели, среди которых особое место занимают стационарные плазменные двигатели (СПД) [1]. Их отличает высокий удельный импульс (1500–3000 с), малый расход рабочего тела и способность функционировать в течение нескольких лет [1, 3].

Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения автономности и срока активного существования космических аппаратов (КА) в условиях роста спутниковых группировок, развития межпланетных программ и обострения проблемы космического мусора [3, 5]. Цель настоящей работы — теоретический анализ возможностей применения СПД, изучение их физических принципов, конструктивных решений и практического использования в современных космических проектах.

Исследование базируется на анализе научно-технической литературы, обзоре конструкторских решений российских и зарубежных разработчиков, а

также изучении данных о реальных миссиях, где применялись СПД. Рассмотрены физические модели ионизации и ускорения плазмы, а также инженерные особенности проектирования двигательных установок (ДУ) на основе СПД. Сравнительный анализ характеристик проводился с учетом критериев эффективности, надежности и экономичности.

Стационарный плазменный двигатель — это электрореактивная система, преобразующая электрическую энергию (от солнечных батарей или РИТЭГов) в кинетическую энергию ионизированного газа — плазмы. Ключевые элементы конструкции (см. типовую схему) включают:

- Разрядную камеру из диэлектрического материала, где происходит ионизация рабочего тела.
- Анод-газораспределитель, подающий рабочее тело (обычно ксенон или аргон) в зону разряда.
- Магнитные катушки (внутренние и наружные), создающие радиальное магнитное поле для удержания электронов и продления их траектории.
- Катод-нейтрализатор, расположенный вне камеры, который служит для эмиссии электронов, поддержания разряда и нейтрализации ионного пучка на выходе [6].

Принцип действия заключается в следующем: электроны, захваченные магнитным полем, совершают дрейфовое движение вокруг оси камеры, многократно сталкиваясь с атомами ксенона. В результате ударной ионизации образуются положительные ионы, которые ускоряются электростатическим полем между анодом и ускоряющим электродом (или просто в области сильного электрического поля) и выбрасываются через сопло со скоростями 20–30 км/с. Катод-нейтрализатор эмитирует электроны во внешний поток, предотвращая зарядку КА [6].

Ключевое преимущество СПД — высокий удельный импульс, что позволяет существенно (в 3–5 раз) сократить массу топлива по сравнению с химическими системами [1]. Однако недостатком является малая тяга (от

миллиньютон до нескольких ньютонов), что ограничивает их применение только операциями коррекции орбиты, ориентации и длительными межпланетными перелетами, но не используется для вывода с орбиты Земли [3].

Области практического применения:

1. Коррекция орбиты геостационарных спутников связи. Наиболее зрелая и коммерчески востребованная сфера. Российские двигатели серии СПД-100 и СПД-140 устанавливались на спутниках «Электро», обеспечивая точное удержание позиции на орбите с погрешностью менее $0,1^\circ$ и увеличивая срок активного существования до 12–15 лет [4]. Подобные решения активно применяются в европейских и американских спутниковых платформах (в частности, в системах связи и навигации, например, Galileo) [4].

2. Межпланетные миссии. Благодаря экономичности, СПД идеальны для зондов, совершающих длительные перелеты к планетам и астероидам. Проекты NASA, ESA и других агентств демонстрируют использование подобных двигателей для исследовательских миссий [3]. Возможность непрерывного ускорения при малом расходе ксенона позволяет набирать высокую конечную скорость без огромных масс топлива.

3. Деорбитинг (контролируемый свод с орбиты). Рост космического мусора делает актуальным использование СПД для управляемого снижения высоты орбиты отработавших КА с последующим сгоранием в атмосфере [5]. Это экологически безопасный способ утилизации, особенно для аппаратов на высоких орбитах, где естественное торможение растягивается на столетия.

4. Малые космические аппараты (CubeSat, микроспутники). Появление компактных версий СПД открывает возможности для точного позиционирования и построения малых группировок (например, для интернет-покрытия или дистанционного зондирования Земли). Эти ДУ позволяют решать задачи синхронизации и формирования созвездий с минимальным расходом рабочего тела [2, 5].

5. Перспективные задачи: создание орбитальных буксиров для перемещения аппаратов между орбитами, обслуживание лунных и марсианских станций.

Несмотря на очевидные преимущества, развитие СПД сдерживается рядом технологических проблем:

- Эрозия внутренних стенок под воздействием ионов, что постепенно снижает эффективность и ресурс. Решение видится в новых материалах (керамика, композиты) и оптимизации геометрии магнитного поля [6].
- Малая тяга — ограничивает применение только задачами коррекции, а не быстрыми маневрами [1].
- Зависимость от энергоснабжения — требует мощных солнечных батарей или ядерных источников, что не всегда приемлемо для малых аппаратов [5].

Тем не менее, мировой опыт и рост числа успешных миссий подтверждают стратегическую ценность СПД. Дальнейшее совершенствование направлено на увеличение срока службы, снижение стоимости и адаптацию для серийной установки на различные типы платформ. В частности, ведутся разработки по использованию более дешевого рабочего тела (аргон) и повышению КПД до 70–80 % [1, 3].

Проведенный анализ показывает, что стационарные плазменные двигатели являются высокоэффективным, экономичным и надежным средством для решения широкого круга космических задач — от коррекции орбиты до межпланетных миссий и борьбы с мусором. Их применение уже стало стандартом для многих современных космических аппаратов, а развитие технологий открывает новые горизонты для автономных и долгоживущих систем [1, 5]. В условиях глобализации космической деятельности и перехода к устойчивому освоению околоземного пространства дальнейшее совершенствование СПД остается одной из приоритетных задач космической инженерии [3, 6].

Использованные источники:

1. Агеев А.С., Косырев В.П. Современные технологии электрореактивных двигателей // Вестник новых информационных технологий. — 2019.
2. Беляев М.А., Кузнецов Н.И. Перспективы использования плазменных стационарных двигателей в малых космических аппаратах // Космические исследования и технологии. — 2020.
3. Гребенкин С.В. Электрореактивные двигатели для долгосрочных миссий: обзор современных решений // Полёт. — 2019.
4. Зимин В.Н., Пичугин Д.Ю. Применение плазменных двигателей в коррекции орбит геостационарных спутников // Известия РАН. Энергетика. — 2020.
5. Петров О.А. Развитие малых космических аппаратов и перспективы их оснащения электродвигательными установками // Вестник машиностроения. — 2020.
6. Смирнов И.Л., Федотов Е.А. Плазменные стационарные двигатели: физические основы работы и конструктивные особенности // Успехи современной физики. — 2019.