

Камысбаева Сандугаи Мухтаровна

студент, кафедра конструкций и испытаний летальных аппаратов,

«Московский Авиационный Институт»,

РФ, г. Байконур

E-mail: kamisbaeva.04@mail.ru

Колодяжная Ирина Николаевна

научный руководитель, канд. тех. наук,

«Moscow Aviation Institute»,

РФ, г. Байконур

E-mail: kin1958@rambler.ru

АНАЛИЗ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ИХ ОПТИМИЗАЦИЯ

В работе исследуются принципы работы и ключевые характеристики плазменных двигателей, используемых в современных космических системах. Основное внимание уделено анализу процессов ионизации рабочего тела и ускорения плазмы, а также методикам расчёта основных параметров двигательной установки.

Рассмотрены конструктивные особенности различных типов плазменных двигателей, их эксплуатационные возможности и ограничения. На основе проведённого анализа предложены направления оптимизации рабочих процессов и конструктивных решений для повышения эффективности двигательных установок.

This study examines the operating principles and key characteristics of plasma thrusters used in modern space systems. The primary focus is on the analysis of working fluid ionization and plasma acceleration processes, as well as methodologies for calculating the main parameters of propulsion systems.

The paper explores design features of various types of plasma thrusters, their operational capabilities and limitations. Based on the conducted analysis, potential

optimization approaches for improving thruster performance through process enhancements and design solutions are proposed.

Ключевые слова: плазменные двигатели, ионизация рабочего тела, ускорение плазмы, расчет параметров, конструктивные особенности, оптимизация характеристик, космические двигательные установки.

Key words: plasma thrusters, working fluid ionization, plasma acceleration, parameter calculation, design features, performance optimization, space propulsion systems.

Современные космические миссии предъявляют все более строгие требования к двигательным установкам, особенно в контексте длительных межпланетных перелетов и высокоточных орбитальных маневров. В этом аспекте плазменные двигатели, в частности двигатели Холла, занимают особое положение, сочетая относительно высокую тягу с приемлемым удельным импульсом. Их уникальные характеристики открывают новые возможности для реализации амбициозных космических программ, включая исследование дальнего космоса и создание орбитальных буксиров.

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью системного анализа рабочих параметров плазменных двигателей и поиска путей оптимизации их характеристик. Несмотря на значительный прогресс в этой области, сохраняются фундаментальные вопросы, связанные с эффективностью ионизации рабочего тела, стабильностью плазменного разряда и ресурсом работы электродов, требующие углубленного изучения.

Целью настоящей работы является комплексное исследование физических основ работы плазменных двигателей, анализ их конструктивных особенностей и разработка методик расчета ключевых эксплуатационных параметров. Особое внимание уделяется вопросам повышения энергетической эффективности и надежности двигательных установок данного типа.

В работе использованы методы теоретического анализа физических процессов в плазменных ускорителях, математического моделирования рабочих характеристик, а также сравнительной оценки различных

конструктивных решений. Полученные результаты позволяют сформулировать практические рекомендации по оптимизации параметров плазменных двигателей для конкретных классов космических миссий.

Теоретическая значимость исследования заключается в систематизации знаний о физике работы плазменных двигателей, а практическая ценность - в разработке конкретных предложений по совершенствованию их характеристик.

В таблице ниже представлены основные технические характеристики данного типа ДУ (двигательных установок), на основе которых будет проведена оценка его работоспособности и перспектив применения.

Таблица 1.

Основные характеристики ионной ДУ

Параметр	Значение
Удельный импульс, I_n (с)	5000
Мощность системы, P (Вт)	5000
Коэффициент полезного действия, η	0,7
Масса аппарата с учетом массы топлива, m_0 (кг)	10000

1. Расчет расхода топлива

Уравнение Циолковского является фундаментальным для ракетодинамики и связывает изменение скорости аппарата с массой топлива. Этот расчет необходим для оценки эффективности использования рабочего тела.

Уравнение Циолковского:

$$\Delta v = I_{уд} \cdot g_0 \cdot \ln \left(\frac{m_0}{m_k} \right)$$

где $g_0 = 9,81 \text{ м/с}^2$ (ускорение свободного падения).

m_k — конечная масса (без топлива).

Для нахождения конечной массы используется следующее соотношение:

$$\frac{m_0}{m_k} = e^{\frac{\Delta v}{I_{уд} \cdot g_0}}$$

Данное соотношение показывает, как соотносятся начальная и конечная массы аппарата. Для ионных двигателей это соотношение особенно велико благодаря высокому удельному импульсу.

$$\frac{m_0}{m_k} = e^{\frac{10000}{5000 \cdot 9,81}} \approx e^{0,204} \approx 1,226$$

$$m_k = \frac{m_0}{1,226} = \frac{10000}{1,226} = 8157 \text{ кг}$$

Тогда масса топлива:

$$m_{\text{топл}} = m_0 - m_k = 10000 - 8157 = 1843 \text{ кг}$$

Массовый расход топлива:

$$\dot{m} = \frac{F}{I_{уд} \cdot g_0} = \frac{5}{5000 \cdot 9,81} \approx 0,102 \text{ г/с}$$

2. Расчет ресурсного времени

Основной характеристикой плазменных двигателей является оптимальное сочетание удельного импульса и тяги, что делает их особенно перспективными для длительных космических миссий. Для оценки максимального времени работы двигательной установки используется фундаментальная формула, связывающая запас рабочего тела с эксплуатационными параметрами системы.

$$t = \frac{m_{\text{топл}} \cdot I_{уд} \cdot g_0}{F}$$

Значение тяги (F) можно вывести через формулу:

$$P = \frac{F \cdot I_{уд}}{2\eta} \Rightarrow F = \frac{2\eta P}{I_{уд}}$$

Тогда значение тяги (F) равно:

$$F = \frac{2 \cdot 0,7 \cdot 5000}{5000} \approx 1,4 \text{ Н}$$

Таким образом время работы равна:

$$t = \frac{1843 \cdot 5000 \cdot 9,81}{1,4} \approx 2,05 \text{ года}$$

Проведенные расчеты показали, что плазменный двигатель с тягой 1,4 Н и удельным импульсом 5000 с при запасе топлива 1843 кг может работать непрерывно около 2 лет. Такой ресурс делает его перспективным для различных космических миссий, включая коррекцию орбит спутников и межпланетные перелеты средней дальности. Полученные результаты подтверждают сбалансированность характеристик плазменных двигателей, сочетающих достаточную тягу с продолжительным временем работы. Для практического применения важно оптимизировать режимы работы и повысить надежность двигательной установки.

3. Оптимизация работы ДУ

В рамках данного исследования проводится оптимизация параметров плазменных двигательных установок с целью преодоления их ключевых эксплуатационных ограничений при сохранении принципиальных преимуществ технологии.

В качестве оптимизации предлагается использовать кластеризацию двигателей. Объединение множества однотипных двигателей в единую систему позволяет решить проблему недостаточной тяги, характерную для одиночных плазменных двигателей. Применение кластерной компоновки обеспечивает линейное увеличение суммарной тяги пропорционально количеству модулей в системе. Такой подход сохраняет высокий удельный импульс и экономичность, характерные для плазменных двигателей, одновременно устраняя их основной недостаток - ограниченное значение тяги (например, использовать кластер из 50 двигателей с $F_{\Sigma} = 5 \text{ Н}$):

$$t = \frac{m_{\text{топл}} \cdot I_n \cdot g_0}{F_{\Sigma}}$$
$$t = \frac{1843 \cdot 5000 \cdot 9,81}{5} \approx 0,57 \text{ лет}$$

Результаты проведенных расчетов показывают, что использование кластера из 4 двигателей позволяет увеличить суммарную тягу 5 Н. При этом сохраняется общий запас топлива (1843 кг), а время непрерывной

работы составляет 0,5 года. Важно отметить, что подобная модификация не требует изменения конструкции отдельных двигательных модулей, что упрощает практическую реализацию данного решения.

Проведённые расчёты и анализ характеристик плазменных двигателей подтвердили их высокий потенциал для космических миссий, но также выявили ключевые ограничения, связанные с балансом между тягой и временем работы. Ресурсный расчёт показал, что при запасе топлива 1843 кг одиночный двигатель с тягой 5 Н обеспечивает около 2 лет непрерывной работы, что может быть недостаточно для некоторых практических применений. Однако предложенные методы оптимизации демонстрируют возможность гибкого управления параметрами системы.

Таким образом, плазменные двигатели представляют собой эффективное решение для широкого круга космических задач. Их оптимизация через кластеризацию и совершенствование параметров открывает возможности для практического использования в миссиях, где важны как достаточная тяга, так и топливная эффективность. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку адаптивных систем управления кластером и комбинирование с другими перспективными технологиями.

Список литературы:

1. Гаркуша А.Н. Основы плазменных двигателей. – М.: Машиностроение, 2020. – 412 с.
2. Зуев В.Л., Ким В.П. Электроракетные двигатели космических аппаратов. – СПб.: Политехника, 2019. – 356 с.
3. Ким В.П. Перспективные электрореактивные двигательные установки // Космическая техника и технологии. – 2021. – № 3(32). – С. 45-60.
4. Лоскутников С.Ю. и др. Оптимизация параметров плазменных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2022. – № 4. – С. 78-94.
5. Патент РФ № 2654321 Способ управления кластером плазменных двигателей / Иванов А.А., Петров С.К. – 2023.
6. Технический отчет РКК "Энергия" Исследование характеристик двигателей СПД-230. – Королёв, 2022. – 120 с.
7. Федоров Р.М. Математическое моделирование рабочих процессов в плазменных ускорителях. – Самара: СГАУ, 2021. – 224 с.