

Использование термоядерного синтеза как метод оптимизации энергозатрат СПД.

Автор:
Злагода Алексей

1 Введение

В эпоху освоения космоса появляется необходимость в дальних полетах, что затрачивают огромное количество ресурсов, таких как топливо и окислитель. Из формулы Циолковского, определяющей скорость, которую развивает летательный аппарат под воздействием тяги ракетного двигателя следует, что для достижения скоростей, необходимых для покидания пределов земли (11.2 км/с) и пределов солнечной системы (16.7 км/с) необходимо либо использовать крайне большие потери в массе, либо использовать большие скорости топлива, либо комбинировать эти два параметра для достижения оптимальных режимов. При этом необходимо учитывать, что существуют ограничения в габаритах космических аппаратов, и, соответственно, ограничение по запасу топлива. Поэтому необходимо увеличивать скорость вылета топлива.

В современных двигателях скорость вылета рабочего тела приблизительно равна 5 км/с , что достаточно далеко от максимально возможной скорости движения объектов во вселенной. В связи с чем можно оптимизировать расход топлива, приблизив скорость вылета объектов к световой.

2 Стационарные плазменные двигатели

Стационарный плазменный двигатель (СПД) — это одна из разновидностей электроракетного двигателя, где электрическая энергия используется для ионизации газа и придания полученной плазме высокой скорости истечения из «сопла». У такого двигателя нет топлива в привычном понимании, т.е. горючего и окислителя, необходимого для химической реакции с выделением тепла. СПД подходит практически любой газ, но лучше использовать химически неактивные и с высокой атомной массой, вроде аргона или ксенона. Плазменные двигатели обеспечивают очень высокую скорость выбрасываемой струи газа, например, для ксенона это около 30 км/с . Для сравнения,

скорость выброса газа у одного из самых эффективных химических ракетных двигателей — кислород-водородного — около 4,5 км/с. Преимуществом химических двигателей является способность выбрасывать сразу много газа, что дает большую тягу. СПД же требует мощного источника электрической энергии, и даже с ним способен выбрасывать лишь незначительную массу газа за момент времени, то есть имеет очень малую тягу и требует много времени на разгон и торможение. Плазменные двигатели применяются только в космосе: оснащенные ими космические аппараты имеют относительно малый запас рабочего тела и большой размах солнечных батарей.

3 Постановка задачи

Существует гипотеза, что при использовании дейтерия возможно уменьшить энергозатраты СПД, так как часть энергии будет возвращаться в плазму от термоядерной реакции.

Необходимо проанализировать возможный выигрыш в энергии. В случае рентабельности данного метода оптимизации попробовать разработать модель (прототип) такого двигателя и проанализировать его характеристики и применимость в современных условиях покорения космического пространства.

4 Предварительная оценка рентабельности

Анализ термоядерного горения рассматривается на основе уравнения энергобаланса плазмы[1]:

$$\frac{\delta W}{\delta t} = P_{ext} + 0.2P_{fus} - P_r - \frac{W}{\tau} \quad (1)$$

где W — тепловая энергия плазмы, P_{ext} — мощность внешнего нагрева, P_{fus} — термоядерная мощность (20% энергии выделяется с заряженными альфа-частицами, которые греют плазму; 80% приходится на нейтроны, которые сразу покидают плазму), P_r — мощность излучения, τ — время удержания энергии.

Используем следующие выражения для составляющих энергобаланса

$$W = \frac{3}{2}nk_BTV \quad (2)$$

$$P_{fus} = n_D n_T \langle \sigma v \rangle E_{fus} V \quad (3)$$

$$P_r = 8.5\alpha r_e^2 m_e c^3 Z_{eff}^2 n_e^2 \sqrt{\frac{k_B T}{m_e c^2}} V \quad (4)$$

$$\langle \sigma v \rangle \approx 1.1 \cdot 10^{-24} T^2 \quad (5)$$

где $n = n_D + n_T + n_e$ – концентрация (плотность) плазмы, n_D – концентрация дейтерия, n_T – концентрация трития, n_e – концентрация электронов, k_B – постоянная Больцмана, T – температура плазмы (температуры ионов и электронов считаются одинаковыми), V – объем плазмы, $\langle \sigma v \rangle$ – параметр скорости реакции, E_{fus} – энергия реакции, α – постоянная тонкой структуры, r_e – классический радиус электрона, m_e – масса электрона, c – скорость света, Z_{eff}^2 – эффективный квадрат заряда ионов плазмы.

Величина Z_{eff}^2 учитывает наличие примесей в плазме, а также может включать различные поправки и другие механизмы излучения. Для чистой дейтериево-тритиевой плазмы $Z_{eff}^2 \approx 1$. Для учета примесей и поправок следует увеличить эту величину и принять, например, $Z_{eff}^2 \approx 2$

$$a = \frac{3}{2} n k_B V \quad (6)$$

$$b = 0.2 \cdot n_D n_T \cdot 1.1 \cdot 10^{-24} E_{fus} V \quad (7)$$

$$c = 8.5 \alpha r_e^2 m_e c^3 Z_{eff}^2 n_e^2 \sqrt{\frac{k_B}{m_e c^2}} V \quad (8)$$

$$a \frac{dT}{dt} = P_{ext} + b T^2 - c \sqrt{T} - a \frac{T}{\tau} \quad (9)$$

Рассматривая ситуацию, когда температура плазмы достигла некоторого предела и в дальнейшем изменяться не будет можно найти энергию частиц плазмы, а следовательно и их скорость. И скорость достаточно близка к скорости света.

Посчитав, получаем, что при удержании плазмы на одну десятую милли-

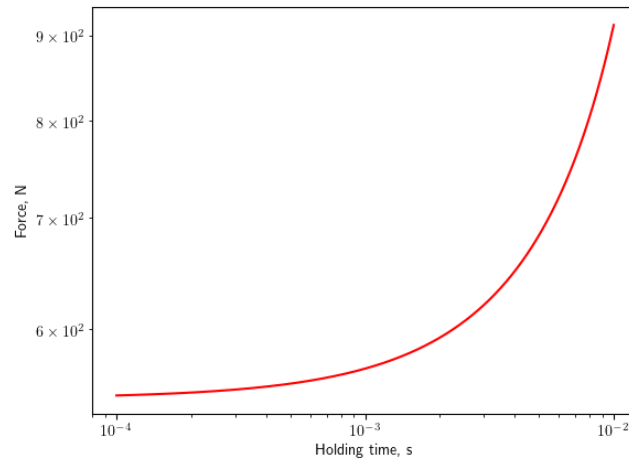


Рис. 1: Зависимость силы тяги от времени удержания плазмы

секунды тяга будет ≈ 550 Н. На графике явно видно, что при увеличении времени удержания плазмы сила будет только возрастать. Для сравнения можно использовать данные о реальных двигателях проекта ОКБ «Факел» "СПД-100". При мощности разряда в 1350 Вт имеется тяга всего в 83 мН. Как

видно, использование термоядерного синтеза как метод оптимизации СПД более, чем рентабелен.

5 Заключение

Анализ ключевых параметров показал рентабельность использования термоядерного синтеза для уменьшения энергозатрат СПД.

6 Используемая Литература и веб ресурсы

1. Исследование режимов термоядерного горения. Светлов А.С. УДК 621.039.6
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ С ВНУТРЕННИМ КАТАЛИТИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ С.Н. Столбов, Ю.В. Дробышевский, И.М. Анфимов, В.А. Варлачев, С.П. Кобелева, С.А. Некрасов, Корженевский А.В. DOI 10.26583/пре.2021.2.13
3. Основы физики плазмы (2-е изд., испр. и доп.) Голант В. Е., Жилинский А. П., Сахаров И. Е. pp. 448 (2011) Links: LibSTC.cc WorldCat: isbn:5811411987 ISBN: 5811411987, 9785811411986 Publisher: Издательство "Лань"
4. <https://habr.com/ru/articles/448088/>
5. Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 60. УДК 621.455.32 "Стационарные плазменные двигатели в России: проблемы и перспективы"