

Использование термоядерного синтеза как метод оптимизации энергозатрат СПД.

Автор:

Злагода Алексей

Руководители:

Макаренко А. О.

Чугунов С. С

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 Актуальность

Как было сказано ранее, увеличение скорости вылета рабочего тела позволит увеличить экономичность ракет и удешевить каждый старт. При увеличении скорости даже на два порядка получается весьма значительный выигрыш в топливе. Также малый объем топлива позволит увеличить длительность эксплуатации космических аппаратов, что позволит еще сильнее уменьшить стоимость ракет.

Вторая проблема, вынуждающая исследовать новые виды схем ускорения рабочего тела, заключается в невозможности реализовать этот выигрыш с помощью химических двигателей. Также в случае увеличения скорости истечения газов в двигателе возникает проблема увеличения силы тяги. Будут создаваться не переносимые для человека перегрузки.

3 Предварительная оценка рентабельности

Анализ термоядерного горения рассматривается на основе уравнения энергобаланса плазмы:

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

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, $Z_{eff}^2 \approx 2$

$$a = \frac{3}{2}nk_BTV \quad (6)$$

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

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

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

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

Выполнив все необходимые вычисления понимаем, что при температурах, близких к температурам термоядерного синтеза скорость частиц будет достаточно близка к скорости света, а значит дальнейшее ускорение частиц бессмысленно.

В связи с нецелесообразностью ускорения плазмы на столь больших температурах можно проанализировать оптимальные условия для протекания термоядерной реакции и все же предложить конструкцию более оптимального плазменного двигателя.

4 Разработка двигателя

4.1 Принципиальная схема двигателя

Идейно двигатель можно разделить на три блока:

1. Подготовительный. В нем дейтерий разогревается до необходимых температур, переводится в состояние плазмы и т.д.
2. Основной. В этом блоке будет происходить термоядерная реакция, которая будет давать необходимое ускорение.
3. Направляющий. Этот блок будет представлять собой модифицированное сопло Лавалья для работы на сверхбольших температурах плазмы.

При этом данное разделение весьма условно, так как из-за энергетических потерь необходимо уменьшать расстояние между блоками.

4.2 Первый блок

Из уравнения энергетического баланса

$$\frac{\delta W}{\delta t} = P_{ext} + 0.2P_{fus} - P_r - \frac{W}{\tau} \quad (10)$$

считая, что наша система пришла к стационарному поведению, можно посчитать количество частиц от подводимой мощности.

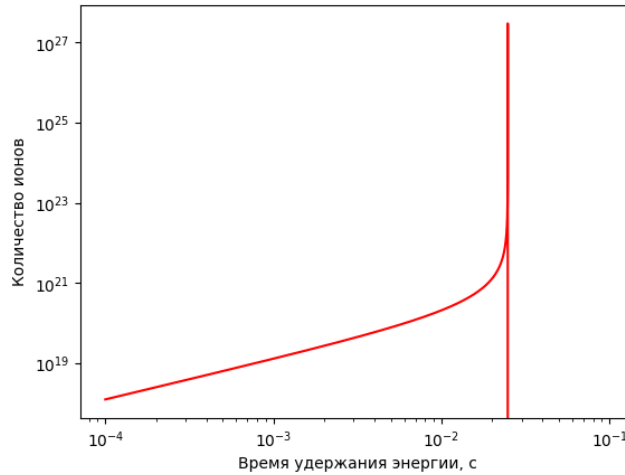


Рис. 1: Зависимость допустимого объема от времени удержания плазмы

Откуда получаем, что время удержания плазмы $\tau \in [0.01; 0.05]$ с. Это дает связь между скоростью протекания ионов по камере и её длиной.