Региональная конференция
по научно-техническому творчеству школьников
«Лабиринты науки»

Секция «Техника»

Ионный двигатель

Салов Алексей Антонович,11 “Б” класс
МОУ «Средняя школа №18» г. Ярославля

Морозов Владимир Васильевич,
декан машиностроительного факультета ,
доктор физико-математических наук,
профессор ЯГТУ

Ярославль, 2021

Оглавление

Введение ……3

1. Физические основы работы установки……..4
2. Сравнительные расчёты……..6
3. Оптимизация ионного реактивного двигателя……..7
4. Возможные сферы применения……..8

Заключение…….9

Список литературы……..10

Введение

Ионный двигатель — тип электрического ракетного двигателя, принцип работы которого основан на создании реактивной тяги на базе ионизированного газа, разогнанного до высоких скоростей в электрическом поле. Достоинством этого типа двигателей является малый расход топлива и продолжительное время функционирования (максимальный срок непрерывной работы самых современных образцов ионных двигателей составляет более трёх лет). Недостатком ионного двигателя является ничтожная по сравнению с химическими двигателями тяга.

Цель работы: Выявление условий для наиболее эффективной работы ионного реактивного двигателя

Основные задачи:

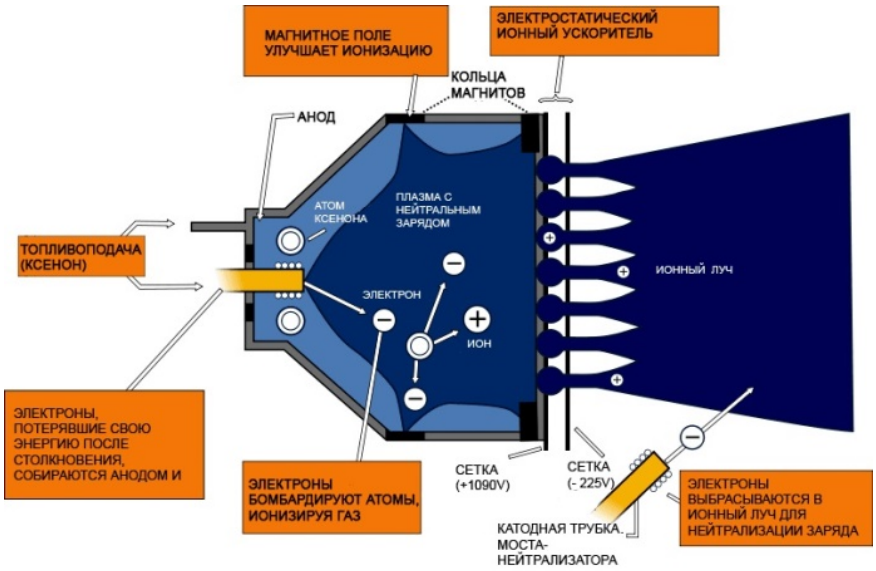
1. Изучить устройство и принцип действия электрического реактивного двигателя.
2. Рассмотреть достоинства, недостатки и области применения ионного реактивного двигателя (ИРД).
3. Предложить параметры по оптимизации ИРД
4. Произвести теоретические расчёты и сравнение с жидкостным ракетным двигателем.

Физические основы работы установки

Принципиальная схема [1] ионного реактивного двигателя (ИРД) приведена на рисунке. Действие двигателя основано на возникновении реактивной силы потока ионов, вылетающих с огромной скоростью из его сопла. Эти ионы ускоряются сильным электростатическим полем, которое создается в устройстве с помощью электростатического ускорителя, состоящего из двух электродов-сеток. Между ними поддерживается большая разница потенциалов порядка 1-2 кВ. Источником ионов является инертный тяжёлый газ (ксенон или аргон), который подается в камеру ИРД, затем ионизируется при столкновениях с электронами путём воздействия на них сильного электрического поля. В камере образуется плазма - смесь из отрицательных электронов и положительных ионов. Для повышения степени ионизации используют магнитное поле, которое искривляет траектории движения электронов и тем самым увеличивает частоту столкновений с нейтральными атомами инертного газа.

Когда ионы попадают в пространство между сетками-электродами, они разгоняются и выбрасываются в пространство, и согласно третьему закону Ньютона, ускоряют корабль. Часть электронов, потерявших энергию после столкновения, притягиваются анодной трубкой и выбрасываются из двигателя под небольшим углом к соплу и потоку ионов. Это осуществляется для того, чтобы корпус корабля оставался нейтрально заряженным, а ионы, «нейтрализованные» таким образом, не притягивались обратно к кораблю, также это создаёт небольшую дополнительную тягу.

Схема ИРД


МАГНИТНОЕ ПОЛЕ УЛУЧШАЕТ ИОНИЗАЦИЮ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ИОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ
КОЛЬЦА МАГНИТОВ
АНОД
АТОМ КСЕНОНА
ПЛАЗМА С НЕЙТРАЛЬНЫМ ЗАРЯДОМ
ТОПЛИВОПОДАЧА (КСЕНОН)
ЭЛЕКТРОН
ИОН
ИОННЫЙ ЛУЧ
ЭЛЕКТРОНЫ, ПОТЕРЯВШИЕ СВОЮ ЭНЕРГИЮ ПОСЛЕ СТОЛКНОВЕНИЯ, СОБИРАЮТСЯ АНОДОМ И
ЭЛЕКТРОНЫ БОМБАРДИРУЮТ АТОМЫ, ИОНИЗИРУЯ ГАЗ
СЕТКА (+1090V)
СЕТКА (- 225V)
ЭЛЕКТРОНЫ ВЫБРАСЫВАЮТСЯ В ИОННЫЙ ЛУЧ ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ЗАРЯДА
КАТОДНАЯ ТРУБКА. МОСТА-НЕЙТРАЛИЗАТОРА

Сравнительные расчеты

Сравним жидкостный реактивный двигатель (ЖРД) и ионный реактивный двигатель (ИРД) по некоторым параметрам эффективности. Положим скорость истекания струи из сопла ЖРД равна 5 км/с (v), а у ИРД - 50 км/с (v). Пусть масса рабочего тела (она равна массе топлива) у обоих двигателей будет 50 кг. Примем массу космического аппарата равной 100 кг.

Найдём по формуле Циолковского [*3*] конечную скорость обоих аппаратов (т.е. когда закончится топливо).

$$V = v \cdot ln\frac{M_1}{M_2}$$

M_1 – начальная масса космического аппарата

M_2 – конечная масса космического аппарата

$$V_{\text{ЖРД}} = 5000 \cdot ln\frac{50+100}{100} \approx 2027\text{м/с}$$

$$V_{\text{ИРД}} = 50000 \cdot ln\frac{50+100}{100} \approx 20273\text{м/с}$$

На самом деле скорость истекания струи из сопла ИРД оптимизацией его параметров можно получить еще больше. Очевидно, что в равных условиях в космическом пространстве ИРД сможет разогнать космический аппарат до больших скоростей, нежели ЖРД.

Почему жидкостные реактивные двигатели не заменяют на ионные? Всё из-за главного недостатка ИРД – чрезвычайно малой тяги. Расчет показывает, что максимальная сила тяги у ЖРД не более 0,1 Н.

Скорость струи: $E_{\text{к}} = \frac{Mv^2}{2} = Ue \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2Ue}{M}}$

Сила тяги: $F = v\frac{m}{t}$, $\frac{m}{t} = \frac{M \cdot I}{e} \Rightarrow F = \frac{M \cdot I}{e} \cdot \sqrt{\frac{2Ue}{M}} = I \cdot \sqrt{\frac{2UM}{e}}$

Оптимизация ионного реактивного двигателя

Проведем анализ влияния конструкционных параметров ИРД и типа инертного газ на его тяговые характеристики. Прежде всего, разберемся с оптимальным подбором топлива (инертного газа). Наилучшим газом для этого, является инертный ксенон, так как он имеет наименьшую энергию ионизации среди всех инертных газов [2]. Также ксенон – тяжёлый газ, его ионы имеют большую массу и, следовательно, больший импульс при прочих равных условиях.

При оптимизации работы ИРД стоит учитывать концентрацию инертного газа. Чем больше газа мы подаём, тем больше образуется ионов и тем сильнее тяга. Но если подать слишком много газа, он не успеет ионизироваться и выйдет из двигателя в чистом виде, произойдёт перерасход топлива. Чем выше ускоряющая разность потенциалов – тем больше ионов образуется в камере и, тем больший импульс они будут иметь. Но может возникнуть состояние насыщения, и мы будем повышать напряжение безрезультатно. Оптимальный вариант сочетания концентрации газа с ускоряющей разностью потенциалов, с параметрами магнитного поля проще всего может быть получен экспериментальным путем.

Возможные сферы применения

Наш ионный двигатель может генерировать ионизированный воздух, который борется с частицами пыли, бактериями, пыльцой и дымом в воздухе. Также поток положительно заряженных ионов способен разгонять облака, так как они аналогично заряжены положительно.

Но самое оптимальное использование электрического реактивного двигателя в космосе. Главное преимущество ионного двигателя – это конечная (разгонная) скорость. Из-за низкой тяги, ИРД невозможно использовать на Земле, однако в условиях невесомости, благодаря высокому отношению заряда к массе, становится возможным разогнать ионы, а соответственно и сам космический аппарат до очень высоких скоростей (вплоть до 50 км/с).Также преимуществом ИРД является - низкая трата топлива, значит он сможет работать гораздо дольше чем ЖРД (рекордное время работы ИРД – 3 года). В настоящее время ионные двигатели используются для корректировки полёта спутников на орбите.

Заключение

Мы выяснили, что ИРД является эффективным и перспективным ракетным двигателем, однако только в условиях невесомости. В настоящий момент нами осуществляется сборка действующей модели ИРД с целью получения экспериментальным путем оптимального варианта сочетания концентрации газа с ускоряющей разностью потенциалов и с параметрами магнитного поля.

Список литературы

1. https://militaryarms.ru/wp-content/uploads/2020/03/skhema-ionnogo-dvigatelya.jpg
2. Ю.П. Райзер. Физика газового разряда. Изд-во Интеллект, 2009, 696 с.
3. Г.Я. Мякишев. Физика: Механика, Учебник (углубленное изучение) 10 класс. Изд-во, Дрофа, 2017, 510 с.