Министерство образования и науки Украины

Харьковский национальный аэрокосмический университет

им. Н. Е. Жуковского

«ХАИ»

Кафедра энергосиловых установок о двигателей ЛА

Разработка и расчет двигательной установки на базе

стационарного плазменного двигателя

пояснительная записка

к курсовой работе по курсу

«Основы теории и функционирования плазменных ускорителей»

Студент гр. xxxxxxxxxxxxxx.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Консультант

Доцент xxxxxxx

Канд. тех. наук

xxxxxxxxx.

Нормконтроль

Ст. прxxxxx, к. т. н.

xxxxxxxxxx.

Харьков 2008г

**Введение**

Космические летательные аппараты, используемые для работы на различных орбитах вокруг Земли и для межпланетных полетов внутри солнечной системы, в большинстве случаев оснащены двигательными установками на основе электрореактивных двигателей, которые создают тягу необходимую для изменения положения летательного аппарата в космическом пространстве. Использование такого типа движителей целесообразно, так как они обеспечивают заданную тягу при меньших затратах рабочего тела по сравнению с двигателями другого типа.

С помощью электрореактивных двигательных установок можно решать следующие задачи: коррекцию орбит искусственных спутников Земли; обеспечение ориентации искусственных спутников Земли; выведение этих спутников на заданную орбиту; перевод космических аппаратов с опорной (околоземной) орбиты на более высокую, включая и задачи вывода космического летательного аппарата на геостационарную орбиту; обеспечение полета космического ЛА к другим планетам солнечной системы, кометам, астероидам и т.д.

**Список условных обозначений, индексов и сокращений**

bk – ширина ускорительного канала, м;

Cт - цена тяги, Н/Вт;

D - средний диаметр движителя, м;

Dвп, Rвп - диаметр и радиус внутреннего полюсного наконечника, м;

Dнп, Rнп - диаметр и радиус наружного полюсного наконечника, м;

Dу - габаритный размер движителя, м;

e – единичный заряд, Кл;

- токовый эквивалент массового расхода рабочего тела, А;



Ip - разрядный ток, А;

Iуд - удельный импульс, м/с;

lk – длина ускорительного канала, м;

M- масса атома ксенона, кГ;

, - массовый расход рабочего тела через анодный блок и катод, кГ/с;



Nи - кинетическая мощность потока ионов, Вт;

Np - разрядная мощность, Вт;

Nт - тяговая мощность, Вт;

P - тяга движителя, Н;

Up - разрядное напряжение, В;

δк - толщина выходных кромок разрядной камеры, м;

ηт - тяговый КПД движителя;

φi - потенциал ионизации рабочего тела, эВ;

τдв - ресурс движителя, с;

КПД - коэффициент полезного действия;

РК – разрядная камера;

РТ - рабочее тело;

СПД - стационарный плазменный двигатель;

ЭРД - электроракетный двигатель

**1. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ**

**ХАРАКТЕРИСТИК И ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ СПД**

Расчёт основных характеристик и основных размеров СПД произведён в соответствии с экспериментально-теоретическими методическими разработками, изложенными в [1, 2, 3, 4], в которых приведены некоторые промежуточные расчёты и дано более подробное объяснение используемых далее соотношений.

К числу основных параметров, с помощью которых можно описать СПД типовой схемы, представленной на рис. 1, относятся:

а) диаметр наружной поверхности ускорительного канала Dн, определяющий типоразмер модели (М-70, М-100, М-140, М-200, М-290);

б) средний диаметр разрядной камеры D;

в) ширина канала bк;

г) длина канала lk;

д) толщина выходных кромок разрядной камеры δk;

Рис. 1. Размеры конструктивной схемы движителя СПД

*lк*

Dвп

*D*

Dнп

*Dу*

Dн

Dв

b*к*

δ*к*

Для общей характеристики конструкции движителя используются также габаритные размеры Dу и lу, внутренний диаметр наружного полюсного наконечника Dнп=D+bk+2·δk и диаметр внутреннего полюсного наконечника Dвп=D-bk-2·δk. В качестве основной задачи расчёта рассматривается задача по определению совокупности значений перечисленных размеров, а также параметров магнитной системы (количество ампер-витков и размеры элементов магнитопровода), которые обеспечивают выполнение заданных требований. Перечисленные размеры определяются с использованием величины среднего диаметра движителя, что должно обеспечить идентичность относительного распределения потенциала и других локальных параметров в РК, и, т.о., обеспечить выполнение условий подобия процессов ионизации и ускорения рабочего тела (РТ) в РК. Как следствие, это позволяет ожидать идентичности интегральных характеристик моделей различного масштаба в сопоставимых условиях работы. В качестве критерия подобия используется условие [4], где λи – средняя длина пробега атома РТ до ионизации, - массовый расход РТ через канал с площадью проходного сечения Sk. Постоянство этого соотношения при прочих равных условиях ограничивает, в частности, минимальную величину концентрации (≈1019 m-3) РТ в РК и, т.о., позволяет определить минимальное значение массового расхода, необходимого для эффективной ионизации и ускорения РТ в движителе. В случае использования ксенона в качестве РТ для достижения приемлемого тягового КПД условие минимального массового расхода приобретает следующий вид



.



Суммарный массовый расход двигателя определяется как

.



Подставляя данные, рассматриваемого, в качестве примера, технического задания (ТЗ), получаем кг/с. При условии, что суммарный массовый расход определяется расходами через анодный блок - и через катод - , полагая в первом приближении, что расход через анодный блок для рассматриваемого ТЗ определяем как . Исходя из ограничения на минимальную величину массового расхода, определяем значение среднего диаметра D=0,06 м.



На основе анализа накопленного опыта по разработке и эксплуатации СПД определены соотношения основных геометрических размеров движителя с тем, чтобы при различных значениях массового расхода и мощности достигался режим работы СПД близкий к оптимальному: ширина ускорительного канала bk=0.25·D=0.015м; толщина выходной кромки разрядной камеры =0.006 м; протяжённость ускорительного канала lk=bk+2·δk.= 0.027 м . Для рассматриваемого ТЗ bk=0.02 м, , lk=0.036 м.



Наружный диаметр ускорительного канала определяется как DH=D+bk=0.075 м. Внутренний диаметр ускорительного канала определяется как DB=D-bk=0.06 м. Габаритные размеры движителя определяются как и .



**1.1 Определение тяговой и кинетической мощностей струи ионов**

Тяговую мощность струи ионов определяем по формуле



Подставляя значения, получаем

.



Кинетическую мощность ионного потока на выходе из РК определяем по формуле



где в зависимости от сорта РТ и разрядного напряжения коэффициенты: характеризует разброс угла вылета ионов относительно оси СПД; - разброс ионов по энергии. Больший разброс соответствует меньшему напряжению Up. = 0,95…0,97 и = 0,93…0,98 для Хе в диапазоне Up=200…300 B [1, 3]. Принимаем = 0,95 и = 0,95.



Тогда величина кинетической мощности струи ионов

Вт.



## 1.2 Определение протяжённости слоя ионизации РТ

В качестве характерной толщины lс слоя, в котором преимущественно происходит ионизация РТ, выбираем такую величину, которая обеспечивает вероятность ионизации РТ не менее 95%. Тогда согласно [1, 3]

,1.1



где λи – средняя длина пробега атома до ионизации ударом электрона; - средняя, на протяжении слоя ионизации, скорость движения атомов РТ вдоль РК, определяемая температурой анода; =- коэффициент скорости ионизации атома Хе при сечении ионизации σi и скорости электронов ve; - среднее, на протяжении слоя ионизации, произведение концентрации электронов на коэффициент скорости ионизации; k= - постоянная Стефана-Больцмана; Та=800…1000 К – диапазон температуры анода при разрядном напряжении от 150 до 350 В; =12,1 эВ - потенциал ионизации атома ксенона; e= Кл – единичный заряд; Sk - площадь поперечного сечения ускорительного канала.



Площадь поперечного сечения ускорительного определяем по формуле

.



Подставляя полученные ранее значения, определяем

.



По формуле 1.1 определяем протяжённость слоя ионизации

.



Полагая, что 95% РТ ионизируется, а затем и ускоряется уже в виде ионов разностью потенциалов , сосредоточенной на протяжении слоя ионизации до средней скорости Vион, определяем концентрацию электронов исходя из условия неразрывности потока массы в РК:



,



где кг - масса иона ксенона; В - перепад потенциала в слое ионизации при потенциале ионизации ксенона – φи=12.1 В.



Подставляя полученные ранее значения, получаем .



Рассчитанная концентрация электронов соответствует режиму работы движителя близкому к оптимальному.

## Расчет разрядного тока и напряжения разряда

Разрядное напряжение определяем с учётом т.н. “эквивалентной разности потенциалов” участка, на котором преимущественно происходит ускорение ионного потока, прикатодного падения потенциала В, а также суммы перепадов потенциала вблизи анода (≈φи) и перепада потенциала в слое ионизации



.



Эквивалентная разность потенциалов, которая определяет ускорение ионов, вычисляется по формуле:

1.2



где kа – коэффициент аккомодации энергии ионов поверхностью стенки принимается как kа=1; - токовый эквивалент массового расхода; - коэффициент, учитывающий долю ионного тока, выпадающего на стенки РК на протяжении (см. рис. 1.2) слоя ионизации и ускорения (СИУ) - lСИУ; Nи - кинетическая мощность струи ионов. Коэффициент рассчитывается по эмпирической формуле



1.3



Величина lСИУ может быть определена на основе анализа экспериментальных данных, полученных с использованием СПД различных типоразмеров. Результаты анализа указывают на то, что СИУ занимает область РК, в которой радиальная составляющая индукции магнитного поля на средней линии канала (см. рис. 2). Полагая, что величина магнитного поля значительно спадает на протяжении lk по экспоненциальной зависимости, величина может быть определёна с достаточной точностью из соотношения



,



где - максимальная (вблизи выхода из РК) величина индукции магнитного поля на средней линии ускорительного канала (определяется далее), а - протяжённость ускорительного канала, определённая ранее.



δ(τпр)

δ(τдв)

φ

lс

lСИУ

lк

Br max

0,6·Br max

lСИУ

Рис. 2. Локализация слоя ионизации и ускорения в РК движителя φ - Угол поворота профиля РК после приработки ().



---- Профиль РК по окончанию проектировочного периода (τдв) работы СПД. Пунктиром обозначены линии равного потенциала ускоряющего электрического поля.

Величину определяем условиями, необходимыми для обеспечения азимутального дрейфа электронов в РК и прямо-пролётного движения ионов - для ларморовских радиусов электрона Rл.е и иона Rл.и должны выполняться соотношения Rл.е<<bk и Rл.и >>bk. При этом экспериментальными данными об интегральных характеристиках СПД различных типоразмеров подтверждено, что для режимов близких к оптимальным выполняется соотношение . Тогда подставляя определённые ранее значения bk и Up, вычисляем



и протяжённость СИУ

.



Подставляя значения в 1.3, получаем .



Токовый эквивалент массового расхода рассчитываем с учётом определённого ранее значения массового расхода по формуле



А.



Подставляя в 1.2 полученные ранее величины, рассчитываем

В.



Определяем разрядное напряжение

В.



Определяем оценочное значение разрядного тока по формуле



.



Проверяем условия и оценивая напряжённость электрического поля как В/м. При =24.7 mTl рассчитываем Rл.е≈ 1.5·10-3 м<<bk=0.02 м и Rл.и≈2,2 м>>bk, что подтверждает выполнение условий “замагниченности” электронов и прямо-пролётного движения ионов в РК в скрещенных электрическом и магнитном полях.



## Расчет КПД и ресурса движителя

Разрядную мощность расчитываем как

.



Для данных ТЗ .



Цену тяги определяем по формуле

.



Подставляя значения, получаем .



Определяем тяговый КПД по формуле

.



С учётом рассчитанных значений .



Далее рассчитываем параметры, определяющие ресурс двигателя. Рассчитываем период приработки РК двигателя, в течение которого происходит снижение и стабилизация скорости эрозии выходных кромок РК потоком ионов

,



где - величина тока ионов, бомбардирующих стенку РК.



,



где - объёмный коэффициент распыления поверхности стенок РК (материал - АБН) ионами Хе при разрядном напряжении 460 В [1-3].



.



Толщина кромки разрядной камеры, которая распыляется ионами за произвольное время τ, определяется зависимостью

, 1.4



где - константа (м), определяемая далее; - время работы двигателя.



Толщину кромки разрядной камеры , которая распыляется ионами за время (в течение которого происходит снижение скорости эрозии из-за поворота профиля эродирующего участка РК на угол φ=150…200), вычисляем по формуле



,



где - длина эродирующего участка (см. рис. 2) соответствует протяжённости СИУ в РК движителя; принимается φ=170.



Рассчитывается величина м.



По формуле 1.4 определяем константу м – глубина эрозии за период приработки РК.



Рассчитываем толщину стенки РК, необходимую для обеспечения требуемого ресурса работы движителя по формуле 1.2

м.



Для того чтобы движитель мог функционировать в течение заданного ресурса времени, величина должна быть меньше, чем толщина выходных кромок разрядной камеры . Проверка этого предположения показывает, что



Т.о., требование по обеспечению заданного ресурса работы РК СПД выполнено.