

УДК 629.78

Н. В. МАСЛЯНЫЙ, А. М. ЧЕРКУН, А. В. ХИТЬКО

Днепропетровский национальный университет, г. Днепропетровск, Украина

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ПУЧКА СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Эффективность работы двигателя, его интегральные характеристики и расходимость потока плазмы существенно зависят от физических процессов, происходящих в области расположения катода, и, в первую очередь, от распределения потенциала плазменного пространства в прикатодной зоне. В статье приведен анализ оптимального положения катода относительно пучка. Исследования проводились на стационарном плазменном двигателе М-35 малого диаметра. В качестве катода использовали катод на соединениях цезия с внутренним разрядом и протоком ксенона. Экспериментально получено влияние расхода через катод на величину напряжения связи с пучком и проведена оценка потенциала пучка.

Ключевые слова: стационарный пламенный двигатель, полый катод, внутренний разряд, потенциал пучка, напряжение связи с пучком.

Введение

Одной из технологий, которые можно применять на борту космического летательного аппарата, следует рассматривать электрические ракетные двигатели (ЭРД) [1]. Они обладают более высоким значением удельного импульса, чем жидкостные ракетные двигатели, что позволяет значительно снизить запас рабочего тела и повысить массу полезной нагрузки.

Для ЭРД характерно использование в качестве основного катода и катода-компенсатора полого плазменного катода с протоком рабочего тела. Расход через катод обычно составляет до 10 % от основного расхода через двигатель, что при прочих равных условиях приводит к снижению удельного импульса. Ввиду этого естественным является стремление разработчиков к снижению расхода через катод и повышению его газовой эффективности [2].

Формулирование проблемы

В современных разработках холловских двигателей большой и средней мощности катод-компенсатор конструктивно отделен от разрядной камеры. Плазменный столб разрядной камеры замыкается на катод через плазменный промежуток от среза разрядной камеры до катода. Катод-компенсатор двигателя выполняет двойную роль: замыкает электрическую цепь и компенсирует пространственный заряд потока вытекающих ионов.

Место расположения катода-компенсатора относительно анодного блока холловского двигателя влияет как на тягово-энергетические характеристики

двигателя, так и на устойчивость его запуска и ресурс. Тягово-энергетические характеристики определяются ценой тяги. Эффективность работы двигателя существенно зависит от физических процессов, которые происходят в прикатодной области.

Проблема определения оптимального положения катода-компенсатора заключается в определении состава и последовательности проведения необходимых исследований на двигателе при разных положениях катода-компенсатора, направленных на получение оптимальных величин параметров и характеристик холловского двигателя, которые обеспечивают заданные требования.

Обзор публикаций

Эффективность работы двигателя, его интегральные характеристики и расходимость потока плазмы существенно зависят от физических процессов, происходящих в области расположения катода, и, в первую очередь, от распределения потенциала плазменного пространства в прикатодной зоне [3, 4].

Расположение катода-компенсатора в непосредственной близости от среза двигателя может привести к ионизации части нейтральных атомов ксенона, выходящих из катода-компенсатора. Ионы и электроны, образующиеся при этом на выходе ускоряющего канала, увеличивают величину разрядного тока, однако, вклад в тягу они не дают, т.е. энергопотребление двигателя растет при неизменных тяговых характеристиках.

При удалении катода-компенсатора от среза двигателя вдоль его оси и по радиусу увеличивается длина

разрядного промежутка, возрастают затраты энергии на нейтрализацию ионного потока. При этом также возрастает напряжение зажигания разряда. Ионы, которые образовались, сбрасываются либо на ось двигателя, формируя там «потенциальную яму», либо уходят к катоду. Попадая на поверхность резервного катода, они могут вызывать его эрозию. Это может быть одной из возможных причин аномальной эрозии неработающего катода, которая выявляется в процессе продолжительных ресурсных испытаний.

Место расположения катода-компенсатора определяется двумя координатами и углом наклона оси катода относительно оси потока плазмы. Одна координата отсчитывается от нижней образующей разрядной камеры до торца катода, вторая координата – от среза анодного блока до оси катода. Угол отсчитывается от оси разрядной камеры до оси катода.

Ниже приведены результаты исследований, которые проведены ФГУП ОКБ «Факел» (Россия) на двигателе КДУ-2 [5]. В результате исследований установлено следующее. Проведенные ресурсные испытания при вертикальном расположении катода-компенсатора на двигателе с координатами, которые были приняты на двигателе КДУ-1 (ось катода-компенсатора находилась от среза ускорителя на расстоянии 30 мм, а торец его был размещен на 15 мм ниже образующей разрядной камеры), показали, что эрозионному износу ионным потоком подвергается торцевая часть катода-компенсатора. Это приводило к нарушению тепловой схемы, к разгерметизации внутренней полости катода-компенсатора и вытеканию ксенона, что снижало ресурс его работы и, тем самым, двигательной установки в целом. При испытаниях рассматривались следующие четыре положения катода-компенсатора по углу: 90° , минус 30° , 45° и 0° .

Из эксперимента видно, что при угле 90° (схема реализована в двигателе КДУ-1) по мере перемещения катода-компенсатора к срезу двигателя осуществляется рост величины тока разряда и при значениях расстояния от среза 5...10 мм он достигает максимального значения. При дальнейшем перемещении к срезу двигателя ток разряда начинает уменьшаться и при значениях расстояния от 0 до минус 8 мм достигает тех же величин, что и у исходной точки при расстоянии, равном 30 мм. При перемещении катода-компенсатора вправо от исходной точки (более 30 мм) разрядный ток уменьшается, а тяга остается приблизительно на том же уровне.

При перемещении катода-компенсатора по вертикали изменение цены тяги аналогично ее изменению при перемещении по горизонтали: при приближении катода-компенсатора к ионному потоку она увеличивается, а при удалении – уменьшается, достигая минимума при значениях координаты по

вертикали 17...25 мм. Такое поведение параметров связано, по всей видимости, с влиянием расхода рабочего тела, поступающего из катода-компенсатора к ионному потоку.

Для определения влияния места расположения катода-компенсатора на запуск двигателя запуски проводились при трех его положениях: вертикальном, под углом, равном 45° , и горизонтальном (угол равен 0°). Величина тока зажигания разряда изменялась от 8 до 420 мА.

Первая серия экспериментов, которая состояла приблизительно из 200 запусков, была осуществлена при горизонтальном размещении катода-компенсатора и трех величинах тока зажигания. Установлено, что с ростом тока возрастает и надежность запуска. При небольшой величине тока зажигания получена приблизительно половина отказов в запуске двигателя.

Анализ переходных процессов при запуске показал, что величина напряжения основного разряда, при котором осуществляется запуск двигателя, зависит от величины тока зажигания. С возрастанием тока зажигания величина напряжения зажигания основного разряда снижается. Так, если при токе зажигания 8 мА величина напряжения зажигания составляет ~ 250 В, то при токе ~ 420 мА – в половину меньше.

Вторая серия экспериментов проводилась при расположении катода-компенсатора под углом к оси двигателя [6]. Минимальная величина напряжения зажигания 50 В получена при вертикальном размещении катода-компенсатора. При размещении его под углом 45° к оси двигателя она равняется ~ 80 В, а при горизонтальном – ~ 120 В.

Исходя из результатов, полученных в ходе ресурсных испытаний по влиянию положения катода-компенсатора на параметры и запуск двигателя, катодный блок должен быть размещен за конусоподобным плазменным потоком, который содержит ионы с энергией выше порога распыления материала катода. Граница конуса выбрана из условия пересечения под углом 50° образующей конусоподобной поверхности с плоскостью внешнего магнитного полюса анодного блока. При этом катод размещается так, что его продольная ось симметрии направлена по касательной к опорным силовым линиям магнитного поля в точке их пересечения с эмиссионной поверхностью катода. Как опорные выбраны силовые магнитные линии, концы которых замыкаются на торцевой поверхности анодного блока, а их кривизна в области выходного среза ускорительного канала минимальна. Координаты точки пересечения продольной оси катода с его торцевой поверхностью должны быть: горизонтальная координата ~ 10 мм, а

вертикальная ~ 20 мм. Такое расположение катода и катодного блока было реализовано при разработке двигателей КДУ-2, а также в СПД-70 и СПД-100.

Постановка задачи исследования

Расход через катод обычно составляет 10 % от основного расхода через двигатель, что при прочих равных условиях приводит к снижению удельного импульса.

Задача этих исследований заключается в определении влияния расхода через катод-компенсатор на величину напряжения связи с пучком, и оценки потенциала ускоренного пучка.

Экспериментальные результаты

Исследования проводились на стационарном плазменном двигателе малого диаметра М-35. Расход через данный двигатель составляет 0,5 мг/с. Использование традиционных катодов типа КЭ-5 с расходом 0,2 мг/с неприемлемо, т.к. последний составляет 40 % от основного расхода через двигатель.

В эксперименте использовался катод с внутренним разрядом [7] на соединениях цезия [8] с протоком ксенона, разработанный в Днепропетровском национальном университете им. Олеся Гончара.

Катод отличается высокой газовой эффективностью (1 А – 0,07 мг/с) и высокой стойкостью к отравлению.

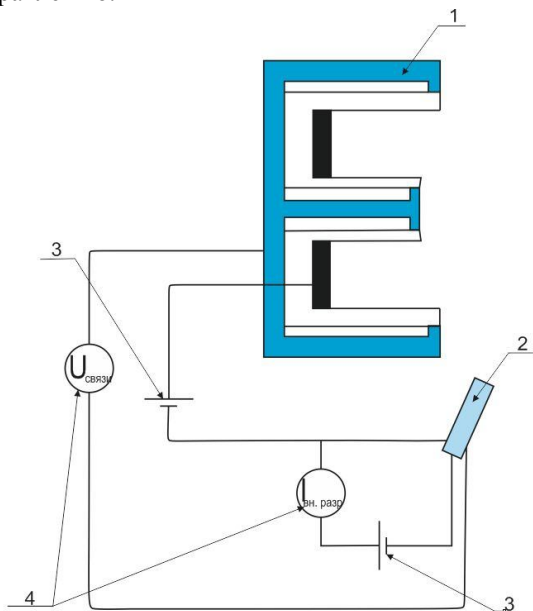


Рис. 1. Схема эксперимента:
1 – двигатель; 2 – катод; 3 – источники питания;
4 – измерительные приборы

Экспериментально были получены зависимости напряжения связи с пучком для различных рас-

ходов через катод и разрядных токов (рис. 2). Анализ экспериментальных кривых показывает, что напряжение связи резко падает при малых расходах и практически не изменяется при больших. Расход в точке перегиба кривой можно считать оптимальным, при котором напряжение связи минимально.

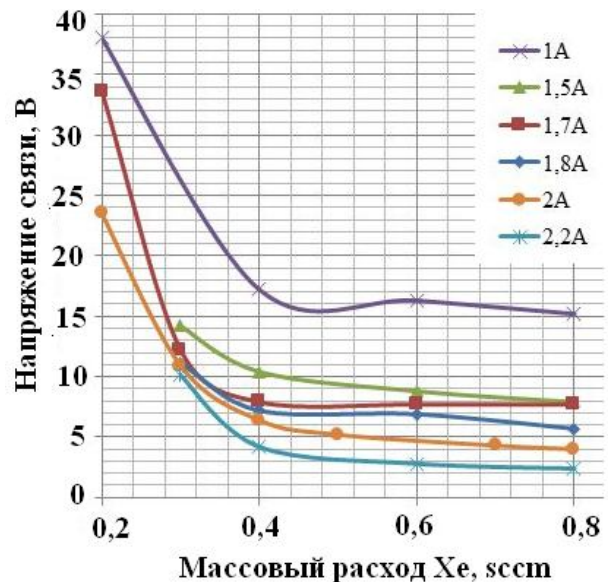


Рис. 2. Зависимость напряжения связи от расхода через катод

Двигатель электрически питается источником напряжения (300 В), которое распределяется между катодом-пучком и анодом-пучком. Прианодное падение потенциала мало (5 В). Можно оценить потенциал пучка как разницу между напряжением питания разряда и напряжением связи с пучком, величину которого мы определили экспериментально.

Таким образом, изменение потенциала пучка можно оценить диапазоном (260...275 В) в зависимости от расхода через катод. С ростом расхода потенциал пучка увеличивается.

Выводы

На основе проведенных испытаний по влиянию места расположения катода-компенсатора на параметры двигателя можно сделать следующие выводы:

- наиболее оптимальным положением катода-компенсатора по цене тяги и коэффициента использования рабочего тела является горизонтальное положение при угле, равном нулю, и горизонтальной координате, равной 17...20 мм;
- поворот катода-компенсатора на угол, равный минус 30°, приводит к некоторому увеличению цены тяги по сравнению с углом, равным 90°;
- оптимальным положением катода-компенсатора по осям и по углу является положение по горизонтальной координате, равной 30...40 мм, верти-

кальной координате, равной 16...25 мм, и углу, равному 45^0 и 90^0 .

Анализ экспериментальных кривых показывает, что напряжение связи резко падает при малых расходах и практически не изменяется при больших. Расход в точке перегиба кривой можно считать оптимальным, при котором напряжение связи минимально.

Литература

1. Морозов, А. И. Физические основы космических электрореактивных двигателей [Текст] / А. И. Морозов. – М.: Атомиздат, 1978 – 328 с.

2. Грановский, В. Л. Электрический ток в газе [Текст] / В. Л. Грановский. – М.: Наука, 1971. – С. 447–449.

3. Архипов, Б. А. Угол разлета плазменной струи [Текст] / Б. А. Архипов, А. В. Десятков, М. А. Красненков // Сб. докл. 6-ой Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. – Днепропетровск: ДГУ, 1986. – С. 12-14.

4. Разлет ксеноновой плазмы в области пониженного давления [Текст] / Б. А. Архипов, А. И. Бугрова, А. В. Десятко, М. А. Красненко // Теплофизика высоких температур. – 1985. – Т. 23, № 4. – С. 45-49.

5. Small SPT unit development and test [Text] / B. Arkhipov et al. // 3-rd International Conference Spacecraft Propulsion, Cannes, France 10-13 Oct. 2000. – Cannes, 2000. – P. 568-571.

6. Extending the range of SPT Operation [Text] / B. Arkhipov et al. // AIAA 96. – P. 2708.

7. Хитко, А. В. Двухступенчатый полярный катод [Текст] / А. В. Хитко // Современные проблемы двигателей летательных аппаратов: тр. 3-й Всесоюз. науч.-техн. конф. – М.: МАИ, 1986. – С. 265-270.

8. Хитко, А. В. Исследование закономерностей активации поверхности катода с внутренним разрядом [Текст] / А. В. Хитко, А. М. Черкун // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. – Днепропетровск: ДНУ, 2009. – Т. 9. – С. 93-97.

Поступила в редакцию 6.05.2014, рассмотрена на редколлегии 12.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Н. М. Дронь, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск.

ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ПУЧКА СТАЦІОНАРНОГО ПЛАЗМОВОГО ДВИГУНА

М. В. Масляний, О. М. Черкун, А. В. Хитко

Ефективність роботи двигуна, його інтегральні характеристики та розбіжність потоку плазми суттєво залежить від фізичних процесів, які здійснюються в області розміщення катода і, в першу чергу, від розподілу потенціалу плазмового простору в прикатодній зоні. У статті надано аналіз оптимального положення катода відносно пучка. Дослідження проводилися на стандартному плазмовому двигуні М-35 малого діаметру. У якості катода використовували катод на сполуках цезію з внутрішнім розрядом і протоком ксенону. Експериментально одержано вплив витрати кризь катод на величину напруги зв'язку з пучком і проведено оцінку потенціалу пучка.

Ключові слова: стаціонарний плазмовий двигун, порожнистий катод, внутрішній розряд, потенціал пучка, напруга зв'язку з пучком.

ESTIMATION OF POTENTIAL OF THE BUNCH OF THE STATIONARY PLASMA TRUSTER

N. V. Masliany, A. M. Cherkun, A. V. Khitko

Overall performance of the thruster, its integrated characteristics and divergence of a stream of plasma essentially depend on the physical processes occurring in the field of an arrangement of the cathode and, first of all, from distribution of potential of plasma space in a zone near to cathode. In the article, the analysis of optimum position of the cathode concerning a plume of plasma is resulted. Research was committed on the stationary plasma thruster M-35 of small diameter. Cathode on cesium compound with the internal discharge and xenon as working fluid was used as neutralizer. Influence of mass flow rate through the cathode on coupling voltage with a plume of plasma and the estimation of plasma plume potential was experimentally received.

Keywords: hall thruster, the hollow cathode, the internal discharge, plasma plume potential, coupling voltage with the plasma plume.

Масляний Николай Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. двигателестроения физико-технического факультета, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина.

Черкун Алексей Михайлович – аспирант, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина.

Хитко Андрей Владимирович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. НИИ энергетики, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск, Украина.