

УДК 621.455.32

Гибридный плазменный двигатель для малых космических аппаратов

В.В. Гопанчук, К.Н. Козубский, М.Ю. Потапенко

Аннотация

Представлены результаты разработки высокоэффективного электроракетного двигателя (ЭРД) малой мощности для малых космических аппаратов (МКА). Исследованы параметры и характеристики двигателя новой схемы ПлаС-40 (серединый диаметр УК 40 мм) малой мощности 200...650 Вт при режимах работы от 100 до 500 В.

Ключевые слова

электроракетный двигатель (ЭРД); малый космический аппарат (МКА); гибридный плазменный двигатель (ГПД)

Введение

В настоящее время одним из активно развивающихся направлений в мировой космической отрасли является создание и применение малых космических аппаратов (МКА). По общепринятой классификации малыми считаются космические аппараты (КА) с массой до 500 кг. Такая тенденция создания МКА привлекательна в первую очередь снижением временных и финансовых затрат при создании КА, снижением рисков в случае неудачного запуска, доступностью технологий, а также возможностью использования для выведения МКА на орбиту ракет-носителей (РН) легкого класса типа «Стрела», «Космос», «Рокот» и т.д. В связи с указанными тенденциями одним из перспективных направлений в разработке и создании электроракетных двигателей (ЭРД) является разработка ЭРД малой мощности [1].

Сегодня широко известными являются стационарный плазменный двигатель (СПД) и двигатель с анодным слоем (ДАС). В начале 90-х годов с целью повышения эффективности, удельных параметров и характеристик для перспективных ЭРД были предложены [2] и апробированы новые конструктивные схемы. Плазменные двигатели, сочетающие в себе отдельные отличительные признаки известных СПД и ДАС, и являющиеся таким образом гибридными плазменными двигателями (ГПД), как показали исследовательские и

демонстрационные испытания, позволяют достигать более высоких значений удельного импульса тяги, приближающихся на высоковольтных режимах работы к параметрам ионных двигателей.

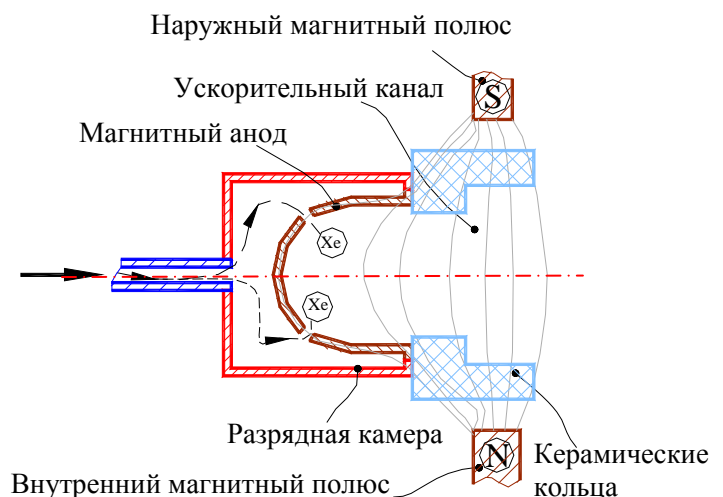
Гибридный плазменный двигатель

Гибридный плазменный двигатель - двигатель, работающий при сочетании принципов механизмов и процессов ионообразования и их ускорения, действующих как в СПД, так и в ДАС. Основным отличительным признаком конструкции таких ГПД является то, что его разрядная камера (РК) выполнена комбинированной, выходная часть ускорительного канала которой образована диэлектрическими кольцами, а ее донная часть выполнена металлической при помощи стенок примыкающего полого анода, который в большинстве случаев совмещает в себе также функции газового распределителя подаваемого газа в РК.

В прототипе двигателя ПлаС-40 (рисунок 1) одна из стенок полого анода выполнена из магнитопроводящего материала, который электрически изолирован от остальных элементов конструкции магнитной системы.



а)



б)

Рис.1. Прототип двигателя ПлаС-40 а) внешний вид после изготовления и б) конструктивная схем разрядной камеры

Выполнение полого анода магнитным позволяет сформировать в РК магнитное поле наиболее оптимальной структуры с большим градиентом радиальной составляющей вектора магнитной индукции \vec{B}_r . Кроме этого, выходные диэлектрические кольца образуют резко расширяющуюся геометрию УК в направлении выхода с поперечным переходом между участками.

Экспериментальная оценка параметров ГПД

В данной работе представлены отдельные результаты разработки высокоэффективного ЭРД малой мощности для МКА. Исследованы параметры и характеристики ГПД ПлаС-40 малой мощности 200...650 Вт при режимах работы в диапазоне от 100 до 500 В.

Для проверки эффективной работы двигателя ПлаС-40 на различных режимах в ОКБ «Факел» были проведены испытания при напряжениях разряда в диапазоне от 125 до 325 В и расходах ксенона в анод от 1,28 до 2,28 мг/с при давлении в вакуумной камере 10^{-4} мм рт. ст. Расход ксенона в катод при испытаниях составлял 0,13 мг/с. Достигнутая при испытаниях максимальная мощность разряда составила 650 Вт.

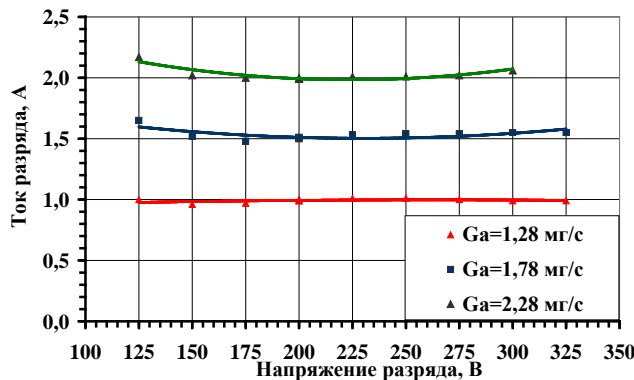
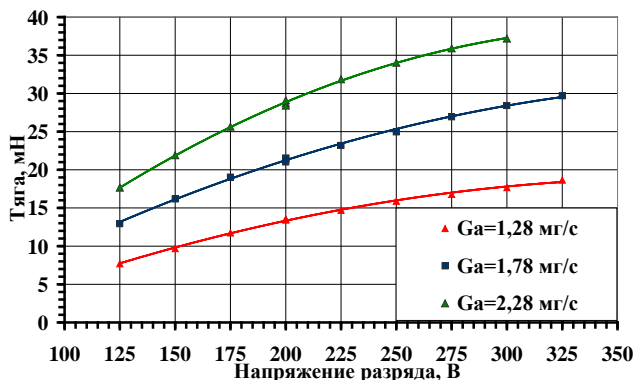


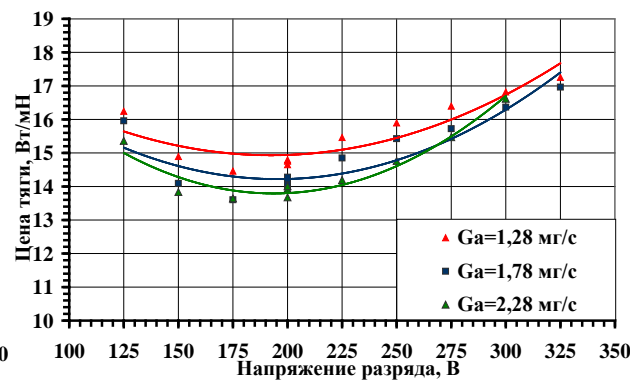
Рис.2. Вольтамперные характеристики прототипа гибридного двигателя ПлаС-40

Вольтамперные характеристики двигателя ПлаС-40 (рисунок 2) были определены при фиксированных анодных расходах, обеспечивающих ток разряда 1,0, 1,5 и 2,0 А. Напряжение разряда изменялось в диапазоне от 125 В до 325 В с шагом 25 В. На каждом режиме выполнялась оптимизация поля по минимуму тока разряда. Из графика видно, что ток разряда практически стабилен при повышении напряжения разряда.

Зависимость тяги, цены тяги, удельного импульса и коэффициента полезного действия (КПД) двигателя представлены на рисунке 3.



а)



б)

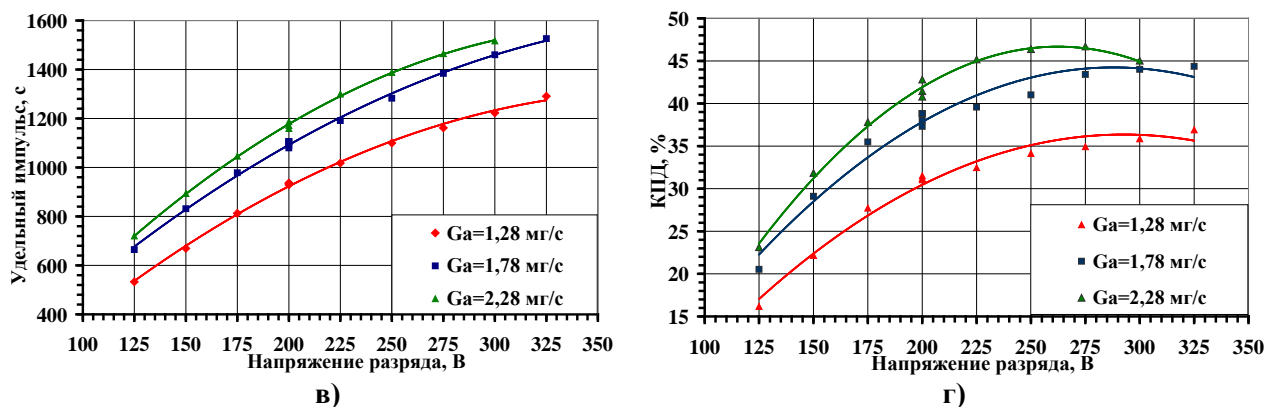


Рис.3. Интегральные характеристики прототипа гибридного двигателя ПлаС-40: зависимости а) тяги б) цены тяги, в) удельного импульса и г) КПД от напряжения разряда

Как видно из графика (рисунок 3), с повышением напряжения разряда, тяга двигателя стабильно растет близко к линейной зависимости. Максимальное значение тяги зафиксировано при анодном расходе 2,28 мг/с и напряжении разряда 300 В и составляет 37,2 мН. Минимальная цена тяги составила 14,5 Вт/мН при напряжении разряда 175 В. Следовательно, при мощности разряда 170 Вт тяга двигателя достигает 11,7 мН. При максимальном напряжении разряда 325 В и мощности 500 Вт полный удельный импульс тяги составил 1526 с. Существенный рост КПД происходит при повышении напряжения разряда до значения 225 В, после чего его значение стабилизируется около ~35 % для расхода 1,28 мг/с и ~45 % для расхода 2,28 мг/с.

С целью определения возможности работы в том числе и при повышенных напряжениях разряда также осуществлялись отдельные контрольные включения на режиме с напряжением разряда 500 В и током разряда 1,16 А. При этом были достигнуты следующие параметры: удельный импульс тяги – 1686 с, тяга – 24,1 мН и КПД – 35 %.

Для проверки стабильности параметров двигателя ПлаС-40 проведена наработка двигателя по 100 часов на режимах:

режим 1 - напряжение разряда $U_p=200$ В и ток разряда $I_p=1,0$ А

режим 2 - напряжение разряда $U_p=280$ В и ток разряда $I_p=1,4$ А

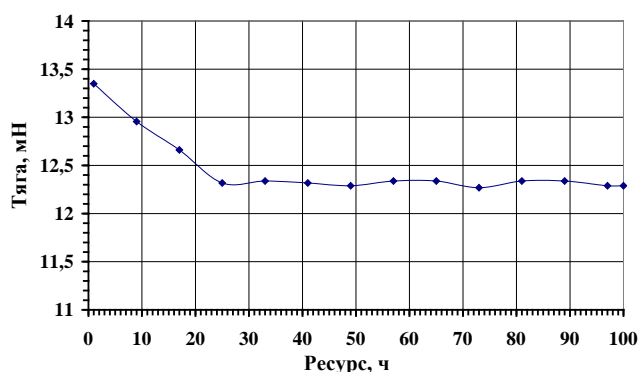
при давлении в вакуумной камере $1,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Объем вакуумной камеры стенда составляет 4 м^3 , диаметр камеры – 0,9 м.

Изменение тяги, удельного импульса тяги и тягового КПД двигателя во время наработки показано на рисунках 4 и 5.

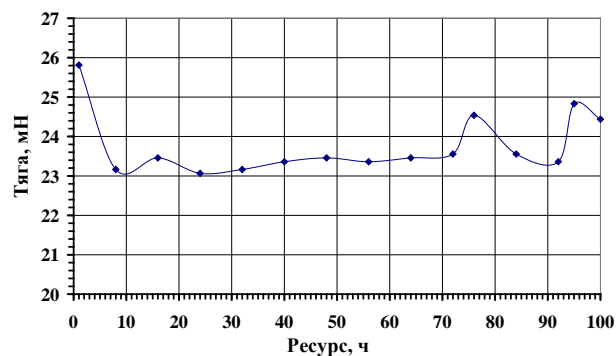
За время испытаний в первые часы работы на каждом режиме произошла некоторая деградация тяги: на первом этапе при мощности разряда 200 Вт на 5 %; на втором этапе при мощности разряда ~400 Вт на 8 %, что, возможно, связано с запылением поверхностей

внутренних стенок РК и токосъемной поверхности анода – изменение электропроводности материалов. Однако необходимо отметить, что в случае более коротких циклов работы и более длительной паузы между циклами, возможно снижение тяги меньше. Во время второго этапа два раза из-за погасаний разряда была выдержана длительная пауза между включениями, оба раза тяга практически возвращалась на начальный уровень, а после нескольких часов работы вновь снижалась.

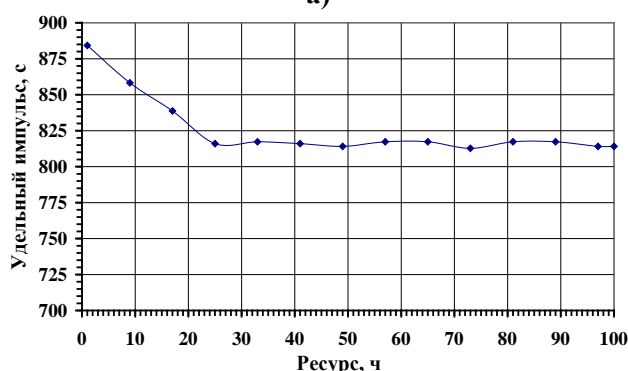
Средняя величина тяги на первом режиме составила 12,5 мН, на втором – 23,8 мН, среднее значение удельного импульса тяги, рассчитанное с использованием расхода, учитывающего поправку на давление в вакуумной камере, 825 с и 1179 с соответственно.



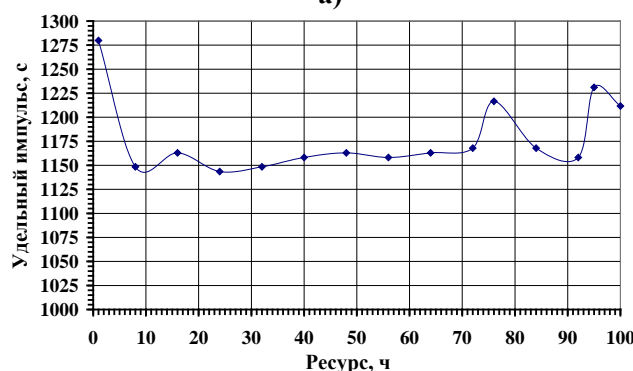
а)



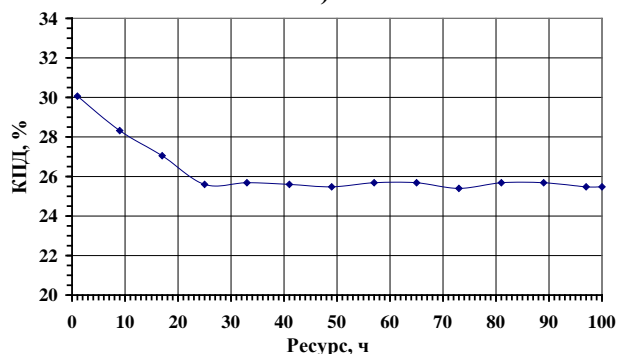
а)



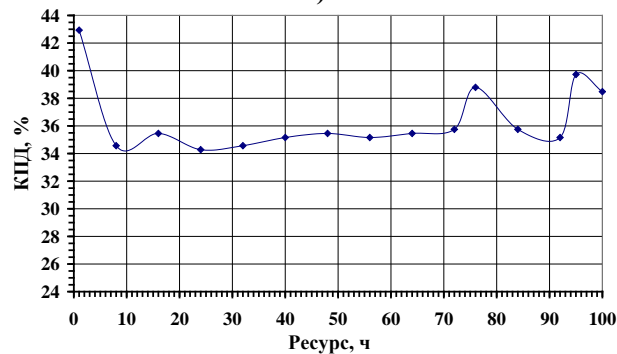
б)



б)



в)



в)

Рис. 4. Изменение а) тяги, б) удельного импульса тяги и в) КПД прототипа двигателя ПлаС-40 при длительных испытаниях на режиме при $I_p=1$ А и $U_p=200$ В

Рис. 5. - Изменение а) тяги, б) удельного импульса тяги и в) КПД прототипа двигателя ПлаС-40 при длительных испытаниях на режиме при $I_p=1,4$ А и $U_p=280$ В

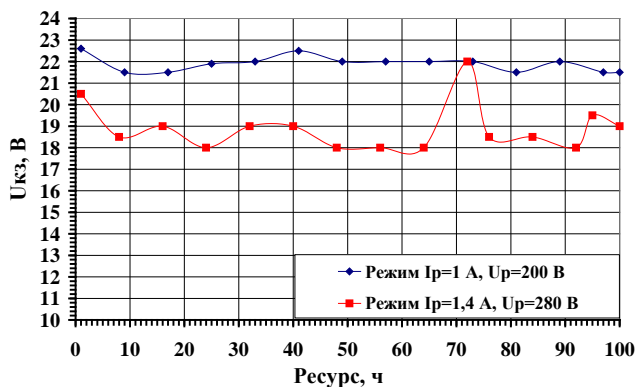


Рис.6. Изменение $U_{кз}$ при ресурсной наработке на двух режимах работы

на двух режимах. Снижение $U_{кз}$ при большем токе является типичным для катода.

В начале и в конце наработки двигателя на каждом режиме проверялась устойчивость двигателя к изменению магнитного поля относительно оптимальной по токам намагничивания точке (рисунки 7 и 8). При выполнении этой проверки ток в одной группе катушек поддерживался постоянным, а в другой изменялся.

Средняя величина полного КПД составила 26,2 % на первом режиме и 36,5 % на втором. Двигатель Плас-40 за 200 часов выработал суммарный импульс 0,013 МН·с. Катод КН-1В, на котором проводились ресурсные испытания, работал стабильно при катодном расходе равном 0,13 мг/с.

На рисунке 6 показан характер изменения напряжения между катодом и землей $U_{кз}$, характеризующий работу катода

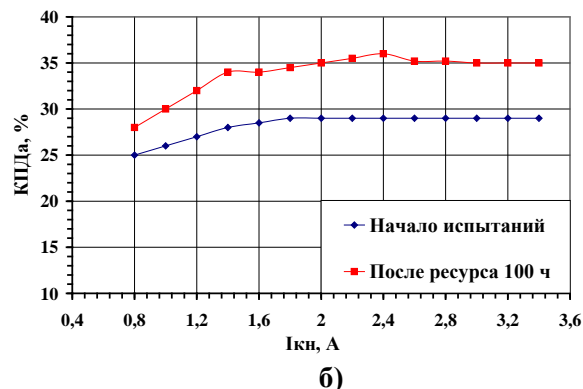
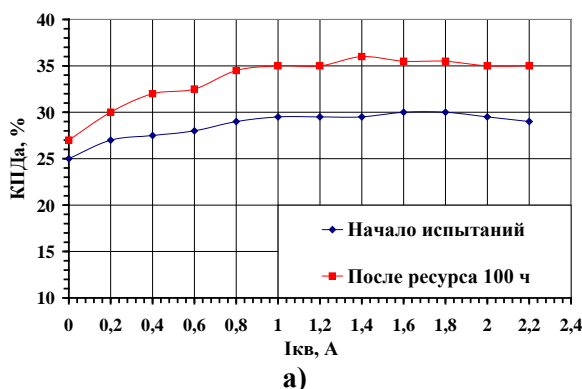


Рис.7. Зависимость КПД анодного блока от токов в катушках на режиме $U_p=200$ В и $I_p=1,0$ А : а) влияние тока во внутренней катушке при токе в наружной катушке $I_{кн}=1,0$ А и б) влияние тока в наружных катушках при токе во внутренней катушке $I_{кв}=2,0$ А

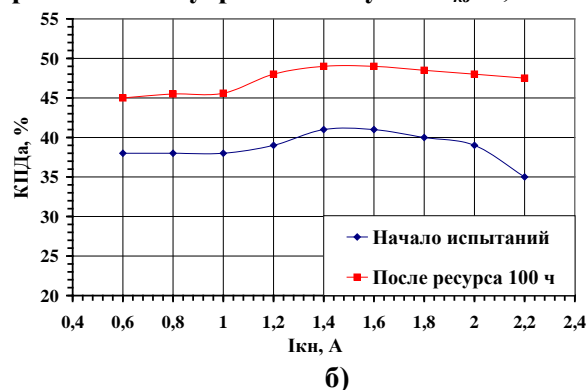
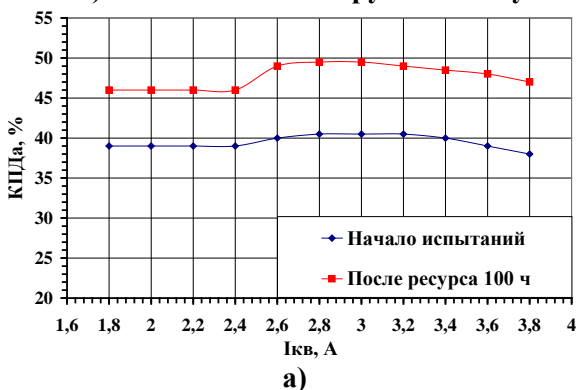


Рис.8. Зависимость КПД анодного блока от токов в катушках на режиме $U_p=280$ В и $I_p=1,4$ А : а) влияние тока во внутренней катушке при токе в наружной катушке $I_{кн}=1,4$ А и б) влияние тока в наружных катушках при токе во внутренней катушке $I_{кв}=2,8$ А

За 200 часов работы характер зависимостей не изменился, хотя уровень тяги и КПД снизился. Таким образом, двигатель ПлаС-40 устойчив к изменению токов намагничивания в широких пределах - его параметры остаются практически постоянными.

Определялась также скорость износа стенок РК путем измерения толщины ее стенок в четырех сечениях по азимуту. Измерения были выполнены перед началом испытаний, а также после завершения наработки 100 часов на каждом из режимов. Средняя величина износа после 100 часов наработки представлена в таблице 1.

Таблица 1

Средняя величина износа стенок РК двигателя после 100 ч наработки

Режим	Износ наружной стенки, мм	Износ внутренней стенки, мм
$U_p=200$ В, $I_p=1,0$ А	0,12	0,21
$U_p=280$ В, $I_p=1,4$ А	0,36	0,54

Как видно из представленных данных, скорость эрозии внутренней стенки оказалась в 1,5... 1,75 раза больше, чем наружной, что связано с перефокусировкой истекающей струи к продольной оси. Как было показано ранее, оптимальное магнитное поле, исходя из интегральных параметров (рисунки 4 и 5), может быть реализовано при различных комбинациях токов в катушках. Таким образом, представляется возможным подобрать такие токи намагничивания, чтобы выровнять износ стенок.

Сопоставление скорости эрозии для двух режимов работы показывает, что на мощности 400 Вт износ возрастает в 2,5...3,0 раза. На тех же режимах тяга отличается только в 1,9 раза. Следовательно, на мощности 200 Вт, хотя тяга окажется и ниже (~1,9 раза), что потребует соответствующего увеличения продолжительности работы, но ресурс РК на 30...60% выше.

Известно, что удовлетворительное приближение по скорости износа дает формула:

$$\Delta R = C \cdot t^{2/3} \quad (1)$$

где ΔR – глубина эрозии на срезе разрядного канала, мм;

C – коэффициент начальной скорости эрозии

t – время работы, ч.

Коэффициент C был определен из условия нормировки на временной базе 100 ч. Прогнозируемое изменение глубины эрозии по выходной кромке стенок РК показано

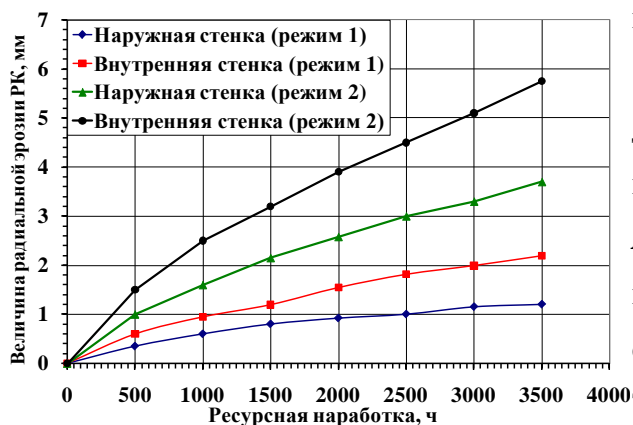


Рис. 9. Расчет эрозии выходных кромок разрядной камеры

Штангенциркулем в четырех сечениях измерялась ширина поясков эрозии. Средняя (по азимуту) ее величина после 100 ч наработки на двух режимах представлена в таблице 2.

Таблица 2

Средняя величина ширины поясков эрозии РК двигателя после 100 ч наработки

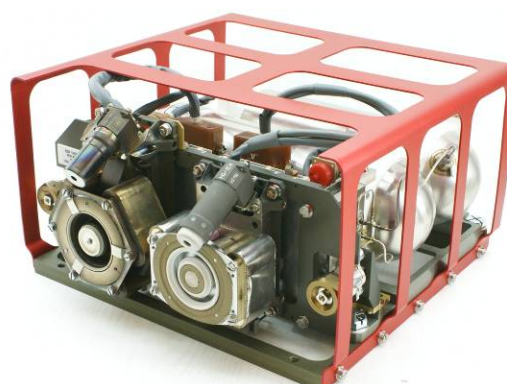
Режим	ΔR , мм	ΔR , мм
$U_p=200$ В, $I_p=1,0$ А	2,38	2,98
$U_p=280$ В, $I_p=1,4$ А	2,15	3,18

Во всех случаях ширина пояска была уже проточки в стенках РК (см. рисунок 1). Можно предположить, что выступающая часть стенки в прианодной зоне обеспечивала формирование потока по центральной части канала, создавая предпосылки для повышения ресурсных характеристик.

В дальнейшем запланированы испытания инженерной модели ПлаС-40 (Рисунок 9) в составе корректирующей двигательной установки (КДУ) «ЭОЛ-2010» для перспективных МКА.



а)



б)

Рис. 9. а) инженерная модель ГПД ПлаС-40 и б) КДУ «ЭОЛ-2010»

на рисунке 9.

Толщины изолятора РК 3 мм достаточно для ресурса не менее 3000 ч на режиме $U_p=200$ В и $I_p=1,0$ А. На мощности 400 Вт ($U_p=280$ В и $I_p=1,4$ А) для обеспечения ресурса 1500 часов потребуется увеличить толщину наружной стенки изолятора по крайней мере до 3,5 мм. Таким образом, РК двигателя имеет достаточный запас по изолятору.

Библиографический список

1. В.В. Гопанчук, М.Ю. Потапенко. Электрореактивные двигатели для малых космических аппаратов // Вестник Российского государственного университета им И. Канта, 2012, выпуск 4, с.60-67.
2. M.Yu. Potapenko, V.V. Gopanchuk. Characteristic Relationship between Dimensions and Parameters of a hybrid Plasma Thruster // IEPC-2011-042, 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11-15, 2011.

Сведения об авторах

ГОПАНЧУК Владимир Васильевич, ведущий конструктор ФГУП ОКБ «Факел».

Россия, 236001, г. Калининград, Московский проспект, 181;

тел.: +74012556662; e-mail: fakel@gazinter.net

КОЗУБСКИЙ Константин Николаевич, главный конструктор ФГУП ОКБ «Факел», ФГУП «Опытное конструкторское бюро «Факел», к.т.н.

Россия, 236001, г. Калининград, Московский проспект, 181;

тел.: +74012556662; e-mail: fakel@gazinter.net

ПОТАПЕНКО Мира Юрьевна, инженер ФГУП ОКБ «Факел».

Россия, 236001, г. Калининград, Московский проспект, 181; аспирант Балтийского федерального университета имени И. Канта,

Россия, 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, д.14;

тел.: +74012556620; e-mail: fakel@gazinter.net