



УДК 629.7.036.74

60

В. В. Гопанчук, М. Ю. Потапенко**ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ
ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Представлены результаты исследовательских испытаний и сравнительного анализа различных электрореактивных двигателей (ЭРД) малой мощности, предназначенных для использования в электрореактивных двигательных установках (ЭРДУ) для малых космических аппаратов. На основе анализа основных параметров и характеристик выбраны наиболее перспективная схема конструкции ЭРД.

The results of investigation tests and comparative analysis of various low-power Electric Propulsion (EP) designed for their application as a part of electric propulsion systems (EPS) for small-sized spacecrafts are presented. Based on the analysis of main parameters and characteristics, the most prospective scheme of the EP design has been selected.

Ключевые слова: электрореактивный двигатель, гибридный плазменный двигатель, малый космический аппарат.

Key words: electric propulsion, hybrid plasma thruster, small-sized spacecraft.

Сегодня одним из активно развивающихся направлений в мировой космической отрасли являются разработка и применение малых космических аппаратов (МКА). Такая тенденция создания МКА привлекательна в первую очередь сокращением временных и финансовых затрат, снижением риска в случае неудачного запуска, доступностью технологий, а также возможностью использования для выведения МКА на орбиту ракет-носителей легкого класса типа «Стрела», «Космос», «Рокот» и т.д. Использование орбитальных группировок МКА позволяет решать ряд задач в различных областях науки, в том числе государственных.

В настоящее время для большинства задач применяются стационарные плазменные двигатели (СПД) классической схемы. Но в связи с современными тенденциями развития МКА перспективным направлением в ЭРД-строении стала разработка эффективного плазменного двигателя малой мощности гибридной схемы.

Цель данной работы – оптимизация конфигурации разрядной и магнитных систем гибридного плазменного двигателя (ГПД) для повышения уровня удельных параметров и характеристик, включая эффективность ГПД в целом, а также проведение исследовательских параметрических испытаний на режимах малой мощности и сравнительный анализ основных параметров и характеристик плазменных двигателей различных схем.

В последние годы в ОКБ «Факел» была предложена новая разновидность двигателя Морозова, выполненного по гибридной конструктивной схеме [1]. Отличительная особенность такого ГПД – комбинированная разрядная камера (РК), выходная часть которой образована диэлектрическими кольцами, а донная металлическая – за счет стенок примыкающего полого магнитопроводящего анода-газораспределителя (рис. 1).

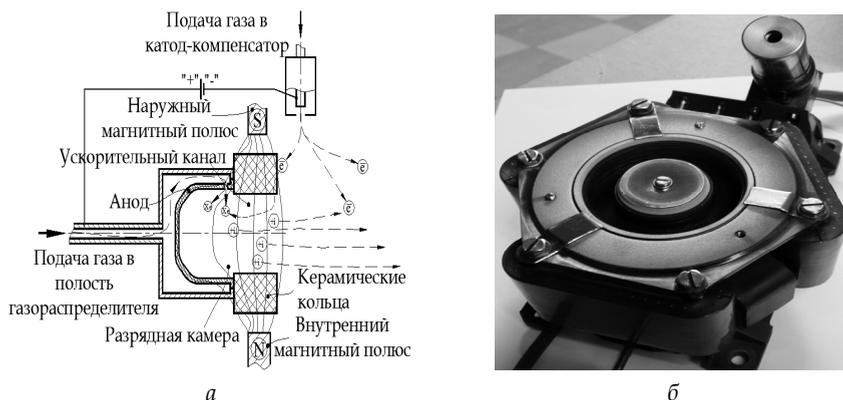


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и внешний вид прототипа ПлаС-40 (б)

Объектом нашего исследования стал прототип ГПД малой мощности ПлаС-40.

Исследования конструкции ГПД проводились по следующим направлениям:

- определение влияния конфигурации РК ГПД, а также организации различных способов подачи рабочего тела в полость РК;
- оптимизация конфигурации магнитной системы с целью снижения потерь в магнитном контуре и улучшения локализации рабочего магнитного поля вблизи среза РК для повышения уровня удельных параметров и характеристик, включая эффективность ГПД.

При исследовательских испытаниях на прототипе ПлаС-40 осуществлялись экспериментальные работы по определению возможности минимизации колебаний разрядного тока I_r . Для этого в модели была предусмотрена возможность изменения глубины РК, а следовательно, и объема за счет внутреннего и внешнего промежуточных колец, устанавливаемых между торцами анода и керамическими кольцами ускорительного канала (УК) (рис. 2).

По результатам испытаний обоих вариантов конструкции зафиксированы прямо противоположные тенденции поведения колебаний I_r , полученные на различных режимах по разрядному току (рис. 3). При испытаниях варианта конструкции ГПД с полым магнитным анодом, в котором использовались дополнительные промежуточные магнитные кольца в РК, при увеличении напряжения разряда колебания I_r уменьшаются (рис. 3, б).

С целью определения степени влияния ширины УК были проведены исследовательские испытания. На первом этапе были установлены кольца, образующие УК шириной 8 мм. На втором этапе были уста-

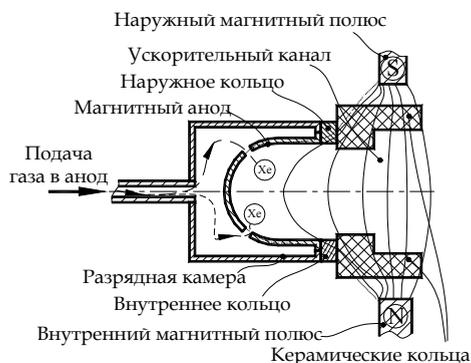
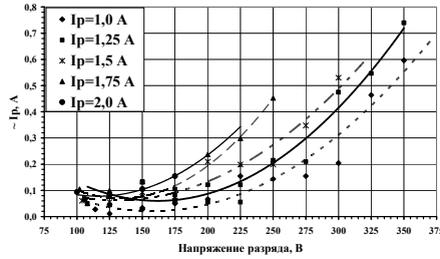


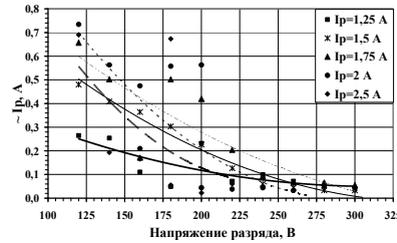
Рис. 2. Конструктивная схема полого магнитного анода с промежуточными кольцами



новлены керамические кольца, формирующие резко расширяющуюся геометрию канала: если в зоне ускорения в области среза ширина УК составляет 11 мм, то на входе и в самой зоне ионизации ширина — всего 8 мм, причем переход между этими участками выполнен в виде ступеньки. Результаты испытаний продемонстрировали, что переход к такой геометрии УК (рис. 2) позволяет повысить уровень удельных параметров ГПД на 8–10 %.



а



б

Рис. 3. Зависимость среднеквадратичных амплитуд I_r полого магнитного анода от напряжения разряда с немагнитными (а) и магнитными (б) кольцами

Для определения влияния равномерности распределения газа по азимуту и по глубине УК, а также наиболее оптимальных мест расположения впрыска газа непосредственно в РК был разработан и изготовлен специальный многополостной полый анод с несколькими независимыми полостями газораспределения и трактами подачи рабочего тела (РТ) в различные области УК (рис. 4).

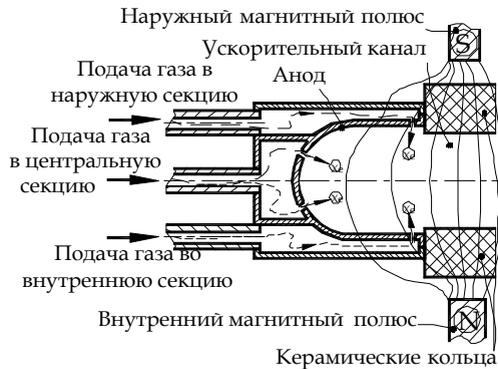


Рис. 4. Многополостной анод-газораспределитель



Многополостной анод прошел испытания в составе ГПД SPT-1. Сравнительный анализ полученных данных показал, что максимальная эффективность работы двигателя достигается при комбинированной одновременной подаче РТ через центральную и внешнюю радиальную области. В этом случае обеспечивается равномерность распределения подачи газа не только в азимутальном направлении, но и по всему рабочему объему при дополнительном распределении газа в прианодной полости. В прототипе ПлаС-40 в связи с малыми размерами РК подача газообразного РТ была наиболее приближена ко входу в зону ионизации и, соответственно, к выходу из РК.

При оптимизации конфигурации магнитной системы (МС) исследовались отдельные конструктивные элементы: магнитные полюса, сердечники катушек намагничивания, магнитные экраны для классической схемы и магнитный анод для МС ГПД. Анализ проводился с использованием программы NISA. Основные критерии оптимизации МС: уровень максимальной индукции магнитного поля B_{rmax} на выходе из УК и градиент $\nabla_z B_r$, а также магнитные поля рассеивания в периферийной области ЭРД. В отличие от традиционной МС (рис. 5, а), используемой в классических СПД, в МС ГПД (рис. 5, б) [2]:

– во-первых, исключены выступающие участки магнитного контура за пределы сердечников наружных катушек, образующих во внешней области дополнительную пару полюсов, что позволило повысить $\nabla_z B_r$ посередине УК на 5 %, общий уровень B_{rmax} в межполюсном промежутке на 4,3 % и уменьшить поле рассеивания во внешней области на 19 %;

– во-вторых, магнитные экраны, приводящие к существенному снижению уровня B_{rmax} в межполюсном промежутке на 31,6 %, заменены на магнитный элемент, входящий в состав анода. При этом увеличен $\nabla_z B_r$ на 9 % и уровень B_{rmax} на 7,1 %, при одновременном уменьшении магнитного поля перед анодом на 76,6 %;

– в-третьих, наружный магнитный полюс изготовлен с постоянным поперечным сечением и неизменной шириной его рабочей части. Кроме того, у данного магнитного полюса было обеспечено постоянство толщины путем исключения влияния локального «утолщения» наружного магнитного полюса в местах его соединений с наружными катушками намагничивания за счет выполнения их щек из немагнитного материала.

Сравнение топологий силовых линий магнитных полей МС (рис. 5) по критерию расположения точки пересечения границы *инверсии* магнитного поля с наружным магнитным полюсом показывает, что для МС с магнитными экранами она оказывается вынесенной в радиальном направлении за пределы сердечника наружной катушки намагничивания. А для оптимизированной МС граница *инверсии* приближена к срезу УК, что говорит о лучшей локализации силовых линий ускоряющего магнитного поля вблизи среза РК. Такая конфигурация магнитного поля положительным образом влияет на фокусировку ускоряемого потока плазмы [2].

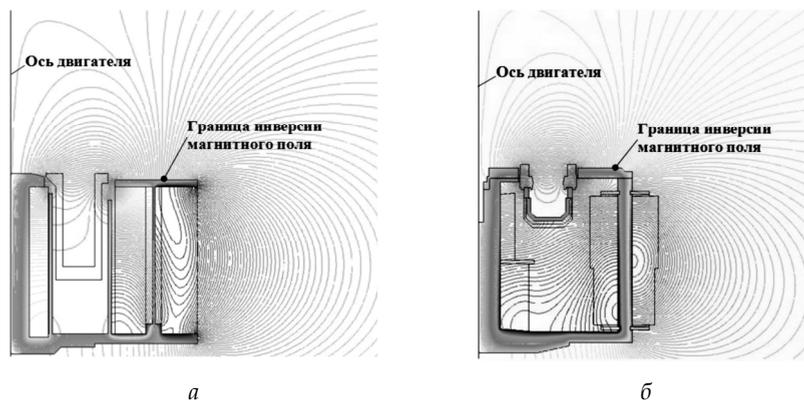


Рис. 5. Конфигурация силовых линий магнитного поля на моделях одного типоразмера:
а – МС с магнитными экранами; *б* – оптимизированная МС

Достигнутые положительные результаты оптимизации были апробированы при проектировании и изготовлении прототипа ГПД ПлаС-40. Двигатель прошел испытания на режимах с разрядными напряжениями от 100 до 280 В продолжительностью 200 ч при малых мощностях на двух уровнях – 200 и 400 Вт.

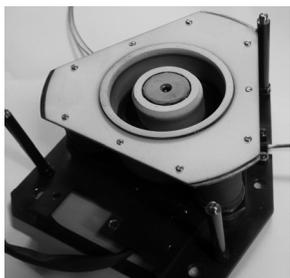


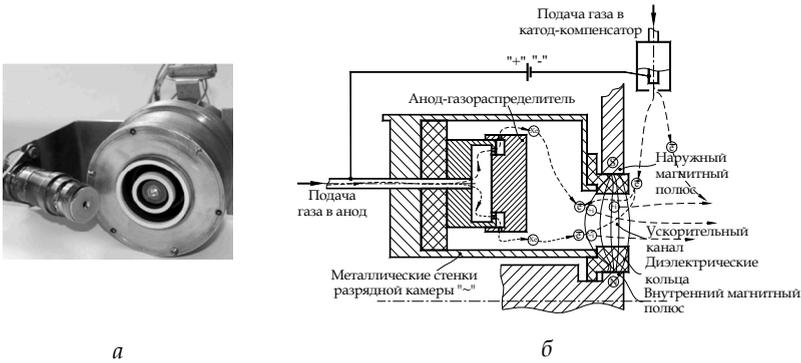
Рис. 6. Внешний вид двигателя СПД-50М (без катода-компенсатора)

Для сравнительного анализа рассмотрим модернизированную модель стационарного плазменного двигателя СПД-50М (рис. 6), соответствующего классической конструктивной схеме СПД.

В США также ведется разработка ЭРД малой мощности гибридной схемы. Компанией «Бусек» (Busek) выпущен двигатель ВНТ-200 с серединным диаметром УК приблизительно 22 мм и номинальной мощностью 200 Вт.

Особенностью такого двигателя является конструкция РК, анод которой состоит из внутреннего анода-газораспределителя конусовидной формы и внешнего анода, образующего большую часть полости РК, что позволяет квалифицировать данную модель как ГПД. Внутренний и наружный анод электрически объединены с тыльных сторон и находятся под одним анодным потенциалом.

В России в НИИ ТП Центре им. М. В. Келдыша (г. Москва) разработан ЭРД КМ-32 с серединным диаметром УК 32 мм номинальной мощности 200 Вт (рис. 7). Конструктивная особенность двигателя – РК, выполненная по комбинированной схеме: стенки РК металлические, находятся под плавающим потенциалом и выполняют функцию магнитопроводящих элементов МС; вблизи среза РК установлены керамические кольца. Кроме того, РК в донной части, в зоне размещения анода, имеет буферную полость шириной больше ширины УК в зоне ионизации и ускорения.



а

б

Рис. 7. Внешний вид (а) и принципиальная схема двигателя КМ-32 (б)

В МИРЭА (г. Москва) разработана лабораторная модель СПД малой мощности (модель МИРЭА) (рис. 8). Серединный диаметр УК составляет 30 мм. Разрядная камера в данном двигателе была выполнена по классической схеме РК СПД. Одной из особенностей конструкции является конфигурация тонкостенного анода в виде цилиндра, расположенного посередине УК и приближенного к срезу РК, тогда как сам газовый распределитель, выполненный из трубки в виде тора, находится в донной части РК.

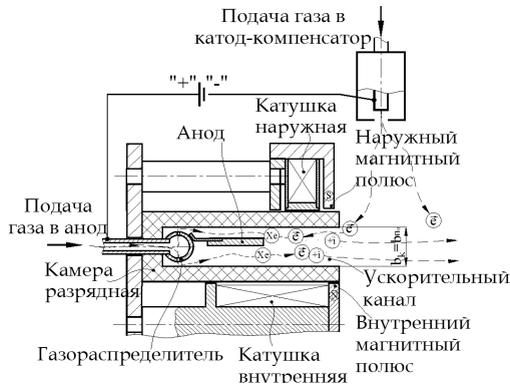


Рис. 8. Конструктивная схема модели МИРЭА

Другая особенность конструкции МС – наличие в магнитопроводе зазора на участке за анодом, что позволяет достигнуть близко к нулю перед анодом уровня V_r .

Итальянской компанией Alta S.p.A. разработан двигатель НТ-100 с номинальной мощностью 100 Вт (рис. 9). НТ-100 выполнен по классической схеме СПД, но в его конструкции в качестве внутреннего и внешнего источников намагничивающей силы ис-



Рис. 9. Внешний вид двигателя НТ-100 Alta S.p.A



пользовались постоянные магниты, что позволяет снизить потребляемую мощность и температуру преимущественно внутренних элементов двигателя. НТ-100 прошел испытания в диапазоне мощностей от 10 до 235 Вт.

Основные параметры и характеристики ЭРД малой мощности различных конструктивных схем при разрядном напряжении 200 В представлены в нижеследующей сводной таблице.

Параметры и характеристики ЭРД при разрядном напряжении 200 В

Модель	Разработчик	Уровень разработки	Мощность, Вт	Тяга, мН	Удельный импульс, с	КПД, %	Цена тяги, Вт/мН
Прототип ПлаС-40	ОКБ «Факел»	Инж. модель	380	28,12	1270	45,8	13,50
			214	16,67	1117	41,2	12,83
СПД-50М	ОКБ «Факел»	Инж. модель	392	27,13	1229	41,5	14,44
			240	15,89	1046	34,1	15,11
КМ-32	НИИ ТП Центр им. Келдыша	Квалифицирован	246	15,05	1019	29,1	16,40
Модель МИРЭА	МИРЭА	Лаб. модель	174	12,82	1055	38,3	13,56
ВНТ-200	Busek	Летный	144	8,72	814	24,3	16,51
НТ-100	Alta S. p. A.	Лаб. модель	190	10,81	1030	28,3	17,59

В результате проведенных исследовательских работ было определено, что существенное влияние на интегральные параметры и характеристики ГПД оказывают протяженность, ширина и форма УК. Минимизация протяженности УК и оптимизация объема РК ГПД ПлаС-40 позволили снизить уровень колебаний I_p и сделать более стабильной работу ГПД при росте разрядного напряжения. Переход к резко расширяющейся геометрии УК в направлении среза РК увеличил уровень удельных параметров и характеристик на 8–10%. Наиболее оптимальной подачей газа в РК ГПД ПлаС-40 является радиальная боковая подача РТ, максимально приближенная ко входу в зону ионизации с внешней стороны полого магнитного анода-газораспределителя. Оптимизация МС ГПД позволила повысить эффективность работы двигателя ПлаС-40 на 10–15% за счет снижения полей рассеивания при одновременном обеспечении круглости всей плазменной струи при использовании МС с несколькими наружными катушками по периферии магнитного контура.

Сравнительный анализ различных российских и ближайших их аналогов зарубежных моделей ЭРД малой мощности показал, что наилучшими удельными параметрами и характеристиками при мощности в диапазоне 100–400 Вт и напряжении разряда 160 и 200 В обладает ГПД ПлаС-40, который обеспечивает при прочих равных условиях больший удельный импульс тяги, что предпочтительней для обеспечения суммарного удельного импульса тяги при разработке новых мини-ЭРДУ для перспективных МКА.



Список литературы

1. Potapenko M.Yu., Gopanchuk V.V. Characteristic Relationship between Dimensions and Parameters of a hybrid Plasma Thruster // IEPC-2011–042, 32nd International Electric Propulsion Conference. Wiesbaden, 2011.

2. Гопанчук В.В., Никулин Н.М., Потапенко М.Ю. Оптимизация магнитных систем электрореактивных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18, №1. С. 64–74.

Об авторах

Владимир Васильевич Гопанчук – ведущий конструктор ФГУП ОКБ «Факел», Калининград.

E-mail: NNikylin@kantiana.ru

Мира Юрьевна Потапенко – инженер ФГУП ОКБ «Факел», асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: mira-world@yandex.ru

About authors

Vladimir Gopanchuk – Chief Designer of EDB Fakel, Kaliningrad.

E-mail: NNikylin@kantiana.ru

Mira Potapenko – Engineer of EDB Fakel, PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: mira-world@yandex.ru