

Разработка и исследование стационарного плазменного двигателя с полым магнитным анодом малой мощности

Потапенко М.Ю.

Опытно-конструкторское бюро «Факел»,

ОКБ «Факел», Московский проспект, 181, Калининград, 236041, Россия

e-mail: info@fakel-russia.com

Аннотация

Представлены результаты разработки перспективной конструктивной схемы стационарного плазменного двигателя с полым магнитным анодом малой мощности для малых космических аппаратов (МКА), обладающего повышенными тяговыми параметрами и характеристиками. Исследованы параметры и характеристики двигателя новой схемы ПлаС-40 малой мощности до 650 Вт в различных режимах работы с напряжением разряда от 100 до 500 В. Определено влияние параметров конструкции и рабочего режима на стабильность работы и характеристики стационарного плазменного двигателя с полым магнитным анодом.

Ключевые слова: электроракетный двигатель (ЭРД), малый космический аппарат (МКА), стационарный плазменный двигатель с полым магнитным анодом.

Введение

В настоящее время для решения ряда специализированных практических задач в космосе применяются малые космические аппараты (МКА) с массой до 500 кг. МКА привлекательны, в первую очередь, снижением финансовых затрат и трудоемкости их изготовления, снижением рисков в случае неудачного запуска, а

также возможностью использования для выведения МКА на орбиту ракет-носителей легкого класса. Наиболее часто на таких МКА используются электроракетные двигательные установки (ЭРДУ) на основе стационарных плазменных двигателей (СПД). Наряду с СПД классической схемы появляется все больше плазменных двигателей с новыми конструктивными схемами, как, например, двигатели «ВНТ» компании Busek (США) и «КМ» ГНЦ «ФГУП им. М.В. Келдыша», продемонстрировавшие возможность повышения уровня тяговых параметров [1].

Цель работы - разработка перспективной конструктивной схемы и создание «холловского» двигателя малой мощности, обладающего повышенными удельными параметрами и характеристиками; исследование влияния параметров конструкции и рабочего режима на эффективность его работы.

Одной из перспективных в этом направлении является схема стационарного плазменного двигателя с полым анодом, экспериментальный образец которого SPT-1 был разработан в ОКБ «Факел» и испытан в России и США [2].

Разработка перспективного высокоэффективного плазменного двигателя малой мощности может быть основана на основе испытанной в SPT-1 конструктивной схеме путем ее массово-энергетической оптимизации.

1. Оптимизация конструкции плазменного двигателя с полым анодом

Эффективность работы стационарного плазменного двигателя зависит от эффективности функционирования его магнитной системы (МС), а также от организации эффективного процесса ионообразования в разрядной камере (РК) двигателя.

1.1 Результаты оптимизации магнитной системы

Для двигателей малого типоразмера необходимо обеспечить магнитные поля оптимальной конфигурации свыше 25 - 35 мТл в ускорительном канале (УК). С точки зрения длительного ресурса предпочтительным является предельное сужение зоны ионизации и ускорения (ЗИУ), определяемой протяженностью области максимальных значений радиальной составляющей магнитной индукции посередине УК и вынос ее вперед по потоку газа за срез РК и магнитные полюса МС двигателя. При усилении рабочих магнитных полей возрастают и потери, обусловленные полями рассеяния, которые необходимо минимизировать. Существенное влияние на эффективность работы СПД оказывает не только уровень, но и конфигурация магнитного поля и его азимутальная однородность распределения в ускорительном канале.

Главной целью оптимизации МС является повышение эффективности ее работы при обеспечении азимутальной равномерности генерируемого магнитного поля в межполюсном промежутке и предельной минимизации магнитного поля перед анодом, а также ослабления полей рассеяния. Таким образом, задача повышения эффективности МС СПД состоит в оптимизации её конфигурации, выборе размеров и взаимного расположения элементов МС.

Основными объектами оптимизации являлись наружный магнитный полюс, сердечник наружных источников намагничивания и новый элемент МС - магнитный анод, заменяющий классические магнитные экраны СПД. Анализ эффективности

элементов МС проводился с помощью двумерного расчета магнитного поля в ППП NISA Display.

В результате анализа различных конфигураций МС, представленных в работе [3], определено, что для равномерного распределения магнитного поля в УК рабочую часть наружного магнитного полюса необходимо выполнить круглой формы при одновременном обеспечении постоянного поперечного сечения по азимуту.

Для снижения полей рассеяния в периферийной области при одновременном повышении общего уровня радиальной составляющей магнитной индукции в канале B_r и скорости ее нарастания в направлении к срезу УК $V_z B_r$, требуется исключить выступающие за пределы сердечников наружных катушек намагничивания участки магнитного контура. Это также позволит обеспечивать равномерное распределение по азимуту границы инверсии магнитного поля и приблизить ее расположение к межполюсному промежутку.

Введение нового магнитного элемента - магнитного анода, по форме подобного основному магнитному контуру, но меньшего размера, позволяет сформировать в УК магнитное поле оптимальной конфигурации при одновременном повышении общего уровня индукции в канале и минимизации его в области подачи газа.

Обобщённый анализ различных элементов МС показал, что наиболее оптимальной конфигурацией будет обладать магнитная система, в которой предельно минимизированы влияния разнообразных негативных факторов, вследствие чего эффективность ее работы будет выше, а энергетические потери меньше. Вариант такой оптимизированной МС двигателя с магнитным анодом, а также вариант МС классического СПД с серединным диаметром УК 40 мм представлены на рисунке 1.

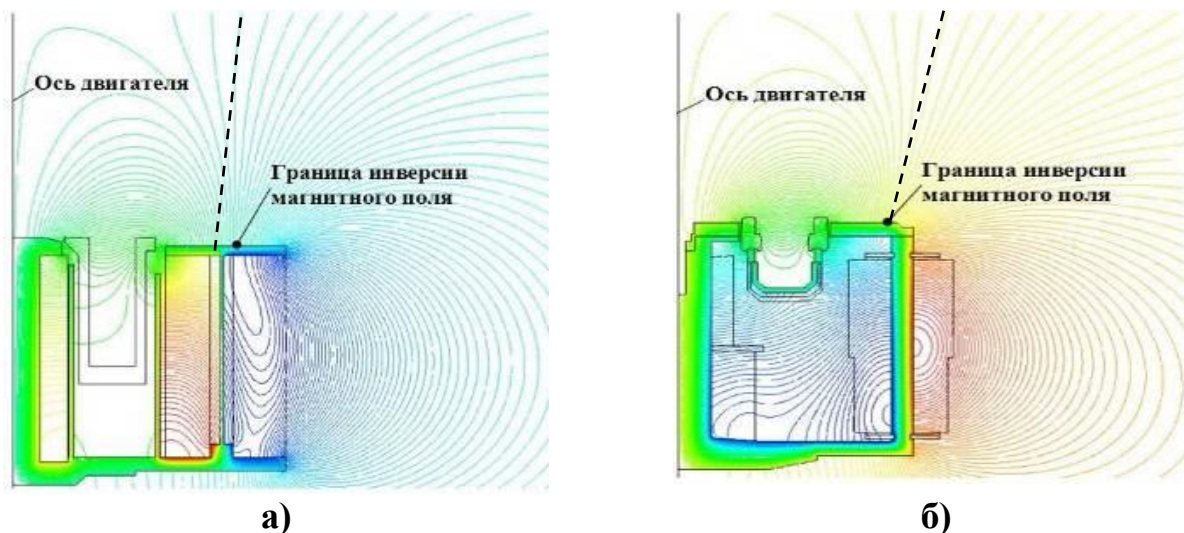


Рисунок 1 - Конфигурация силовых линий магнитного поля а) СПД с магнитными экранами (СПД-50); б) двигателя с магнитным анодом (ПлаС-40)

Приведенные выше рекомендации по совершенствованию конструкции МС позволяют повысить уровень тяговых параметров двигателя на 5-10 %, что подтверждено результатами испытаний данных моделей на стенде ОКБ «Факел» при одних и тех же условиях (рисунок 2, таблица 1).



Рисунок 2 - Внешний вид двигателей а) СПД-50 и б) ПлаС-40

Таблица 1

Параметры двигателей малой мощности СПД-50 и ПлаС-40

	I_p, A	U_p, B	$\sim I_p, A$	$\sim U_p, B$	I_k, A	$I_{подм}, A$	U_k, B	$B_{г, max}, мТл$	$F, мН$	$I_{уд}, c$	$КПД, \%$
ПлаС-40	1,31	160	0,06	3,0	1,31	0	6,6	17,0	16,0	940	35
	1,32	200	0,04	2,6	1,32	0	7,0		22,1	1290	53
СПД-50	1,38	160	0,12	3,0	1,38	0,93	4,4	21,5	13,6	867	28
	1,41	200	0,09	2,3	1,41	0,8	3,4		18,7	1100	36

Из результатов испытаний видно, что при токе в катушках намагничивания $I_k=1,31 A$ тяговые параметры двигателя ПлаС-40 значительно выше выходных

параметров его аналога. При испытаниях СПД-50 ток в катушках намагничивания составлял $I_k=1,38$ А при дополнительном токе подмагничивания $I_{подм}=0,93$ А, следовательно, суммарный ток в катушках равен $I_{к\Sigma}=2,31$ А, что почти в 2 раза больше, чем при испытаниях двигателя ПлаС-40.

Таким образом, двигатель с магнитным анодом ПлаС-40 обеспечивает более высокие выходные параметры при меньших энергетических затратах. Высокие тяговые параметры достигаются даже при меньших магнитных полях в УК. Следовательно, можно сделать вывод о снижении потерь в магнитном контуре, а также о повышении эффективности работы МС на ~8-10%.

1.2 Результаты оптимизации конфигурации разрядной камеры

Уровень достигаемых тяговых и ресурсных характеристик СПД в значительной степени зависит от эффективности процессов ионообразования и ускорения в РК. Эффективность работы двигателя определяется эффективностью использования рабочего тела (РТ), для повышения которой необходима оптимизация организации процессов ионизации и ускорения путем реализации новой конструкции РК. Степень ионизации РТ является одним из основных факторов, определяющих значения КПД и удельного импульса тяги. Это влияние наиболее существенно для изменения удельного импульса при фиксированных значениях напряжения разряда и расходе РТ. Для обеспечения полной ионизации газа в РК двигателя новой схемы необходимо, во-первых, обеспечить более рациональное расположение анода относительно ЗИУ плазмы, во-вторых, решить задачу по организации наиболее эффективного газораспределения в РК. При этом необходимо стремиться к

обеспечению высокой азимутальной однородности газораспределения в РК не только по азимуту УК, но и по всему объему анодной полости. Кроме того, оптимизация формы выходной части изолятора РК также позволит повысить уровень тяговых параметров двигателя и обеспечить их стабильность при работе.

Основными характерными размерами РК является протяженность и ширина ускорительного канала двигателя. Результаты исследования влияния протяженности и формы выходной части УК на параметры двигателя с полым анодом SPT-1 показали, что протяженность канала в зоне ускорения оказывает существенное влияние на удельный импульс тяги двигателя [4]. Укорочение длины стенок РК двигателя SPT-1, изготовленных из керамики, в зоне ускорения на 2,5 мм привело к необходимости увеличения напряжения разряда на ~30% с целью обеспечения одинакового удельного импульса тяги. Однако установлено, что данное снижение параметров компенсируется при переходе к резко расширяющейся геометрии ускорительного канала при неизменных затратах мощности разряда. Следовательно, наиболее оптимальной формой УК является профилирование стенок РК таким образом, чтобы ширина на входе в зону ионизации была меньшей для обеспечения высокого удельного расхода в канале. При этом для достижения высоких значений тяги в зоне ускорения формируется резко расширяющаяся геометрия УК за счет ступенчатого уширения, переходящего с цилиндрического участка в конусообразный участок со стороны выхода УК [5].

Данный результат был применен в двигателе с полым магнитным анодом малой мощности ПлаС-40. Как демонстрирует рисунок 3, при использовании расширяющейся геометрии УК

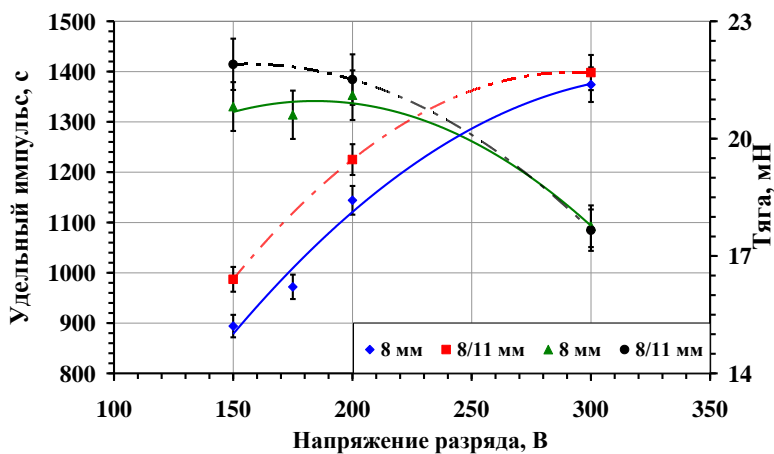


Рисунок 3 - Зависимость тяги и удельного импульса от напряжения разряда при различной ширине УК ПлаС-40

тяговые параметры двигателя ПлаС-40 повышаются на 5-8 % при неизменных энергетических затратах.

Повышение эффективности распределения газа в РК может быть достигнуто за счет управления концентрацией газа в ее пристеночных участках путем перехода к новой ее геометрии и осуществления дополнительного впрыска части РТ непосредственно в пристеночных областях.

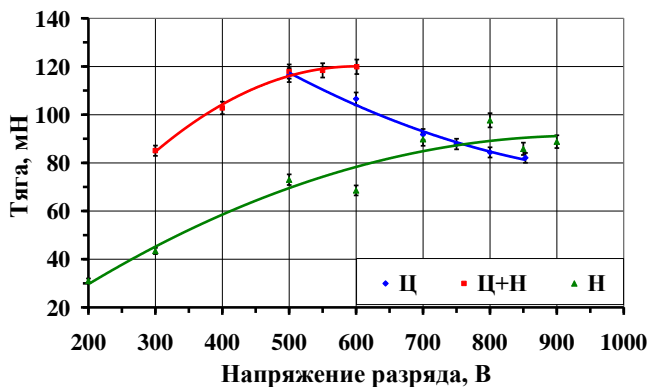
В работе [6] впервые показано влияние способа подачи рабочего газа в РК на удельные параметры и характеристики двигателя с полым магнитным анодом. Проведены результаты исследования влияния равномерности распределения газа по азимуту и по глубине анодной полости на эффективность процессов ионизации и ускорения; определено наиболее оптимальное место впрыска газа в РК.

Исследования проводились на специальном многополостном полом аноде-газораспределителе с несколькими независимыми трактами подачи газа в

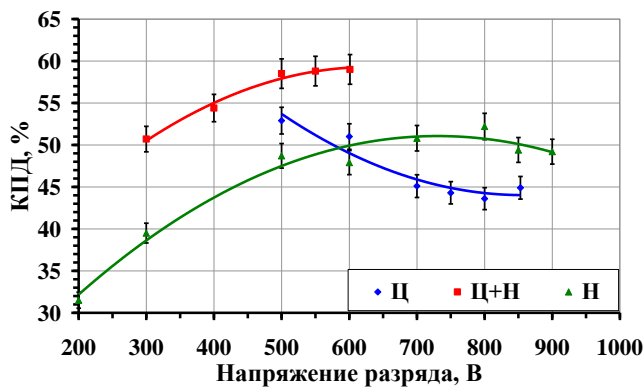
различные области УК (рисунок 4). В результате установлено (рисунок 5), что наиболее эффективно двигатель работал при комбинированной одновременной прямоточной подаче рабочего тела через центральный канал и радиальной подаче через наружную секцию полого анода (Ц+Н).



Рисунок 4 - Внешний вид многополостного анода-газораспределителя

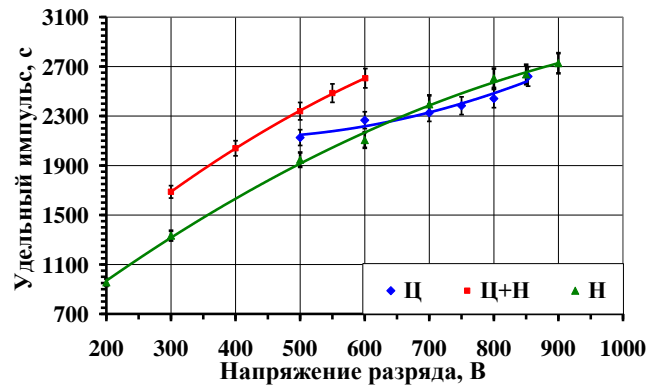


а)



б)

В этом случае обеспечивается равномерность распределения подачи газа не только в азимутальном направлении, но и за счет дополнительного распределения газа по глубине канала, т. е. по всему рабочему объему прианодной полости.



в)

Рисунок 5 - Зависимость а) тяги, б) КПД и в) удельного импульса двигателя SPT-1 от напряжения разряда при различных схемах подачи РТ (Ц – классическая подача газа из глубины камеры, Ц+Н – комбинированная подача из глубины камеры и наружной секции полого анода, Н – подача газа из наружной секции анода)

Учитывая полученный результат, а также малые размеры анодной полости в полом аноде двигателя ПлаС-40 были применены радиальные каналы впрыска,

расположенные на наружной стенке анода вблизи входа в ЗИУ. Проведенные испытания двигателя подтвердили высокую эффективность его работы при применении только радиальных наружных каналов впрыска [6].

Результаты анализа эффективности работы двигателя по коэффициенту использования РТ, полученные при различных режимах по току разряда, представлены в виде зависимостей от напряжения разряда на рисунке 6. Сравнение значений ионного тока I_i и расхода РТ I_m ,

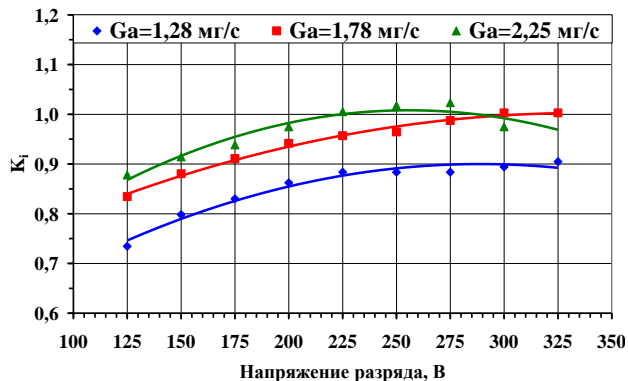


Рисунок 6 - Зависимость коэффициента ионизации от напряжения разряда двигателя ПлаС-40

выраженного в токовых единицах, показывает, что коэффициент использования РТ $K_i = I_i / I_m$ близок к 1, что говорит об эффективной ионизации газа в РК двигателя.

1.3 Разработка газoeлектрического узла с увеличенной электрической прочностью

Одной из важных задач при разработке двигателя является обеспечение электрической прочности элементов его конструкции. Наиболее частым является электрический пробой по газу в тракте подачи РТ в анод и катод.

Наиболее критичным элементом конструкции в части обеспечения электрической прочности является газoeлектрический узел. Такой узел применяется в магистралях подачи РТ и электрически разобщает участки магистралей, идущих от внешних источников хранения и подачи РТ. Применяемые газoeлектрические узлы имеют относительно большие размеры и поэтому их размещение в двигателях малого

типоразмера затруднительно [7]. В связи с этим возникает задача разработки нового газoeлектрического узла, способного обеспечить электрическую прочность трактов подачи РТ в процессе работы при минимальных массе и габаритных размерах.

На возникновение электрического пробоя оказывают влияние основные параметры: давление газа, расстояние между электродами и состав рабочего газа, а также множество других факторов: рабочая температура, электрический потенциал электродов, конфигурация и геометрическая форма электродов, материал изолятора и т.д.

Исследования условий возникновения электрических пробоев в трактах подачи РТ в анодную полость двигателя показали, что закон Пашена $U_{np} = f(pd)$, по которому напряжение пробоя зависит от произведения давления p и расстояния между электродами d , не достаточно точно описывает процессы возникновения электрического пробоя в трактах подачи газа в разрядную камеру двигателя (рисунок 7). Несовпадение кривой Пашена и экспериментальных данных обусловлено действием неоднородных электрических полей, формой электродов, а также относительно протяженным каналом. Также определено, что уровень напряжения

пробоя в газoeлектрических изоляторах в большей степени зависит от рабочей температуры и, согласно результатам экспериментов, изменяется пропорционально $\sim pd/T$.

Снижение значения напряжения пробоя при повышении

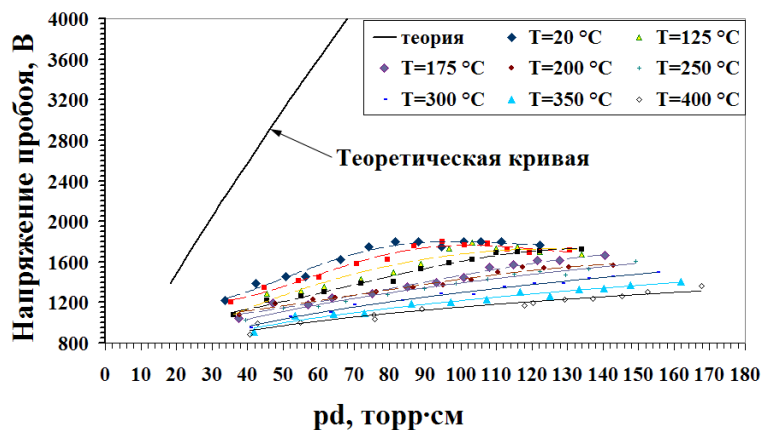


Рисунок 7 - Корреляция экспериментальных зависимостей напряжения пробоя от pd при различных температурах с теоретической зависимостью

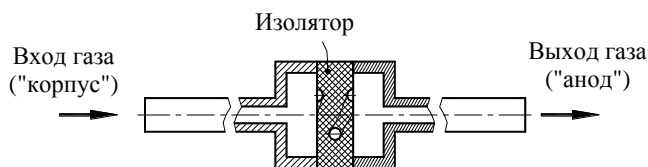
температуры обусловлено облегчением ионизации рабочего газа и его электрического пробоя при нагревании (возрастанием кинетической энергии частиц газа).

В работе установлено, что напряжение пробоя при росте температуры в условиях постоянного давления зависит в большей степени от изменения плотности газа. Поэтому, для описания зависимости возникновения пробоя необходимо уточнение закона Пашена, в котором абсолютное давление среды p может быть заменено на плотность газа – $U_{np} = f(\rho d)$, где ρ – плотность газа, зависящая от температуры и давления газа.

На основании проведенных исследований создан новый газoeлектрический узел, обеспечивший высокую электрическую прочность при минимизации его габаритных размеров с исключенным риском возникновения пробоя (рисунок 8) [8]. Созданный узел имеет минимальную массу – 5 г, и размеры: диаметр – 7,3 мм, длина – 13 мм. Он обеспечивает высокую электрическую прочность двигателя при работе в высоковольтных режимах до $U_p = 1500$ В с более, чем двукратным запасом.



а)



б)

Рисунок 8 - а) Газoeлектрический изолятор после изготовления и б) конструктивная схема газoeлектрического изолятора

Такой изолятор был использован в конструкции высоковольтных двигателях

ПлаС-120 [2], СПД-100Д и СПД-140Д.

2. Экспериментальное исследование двигателя ПлаС-40

Испытания двигателя ПлаС-40 проводились при напряжениях разряда от 100 до 500 В в диапазоне расходов ксенона в анод от 1,25 до 2,5 мг/с и в катод 0,18 мг/с в

горизонтальной вакуумной камере при динамическом давлении не более $1,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. (по воздуху). Внешний вид двигателя при испытаниях представлен на рисунке 9.

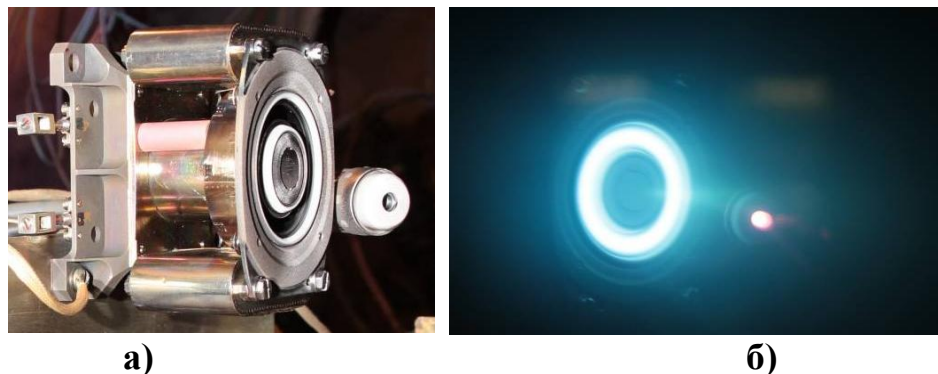


Рисунок 9 - Двигатель ПлаС-40 а) после испытаний и б) во время проведения испытаний

Вольтамперные характеристики двигателя (рисунок 10) определялись при фиксированных анодных расходах, обеспечивающих ток разряда от 1,00 до 2,25 А с шагом 0,25 А. На каждом режиме выполнялась оптимизация поля по минимуму тока

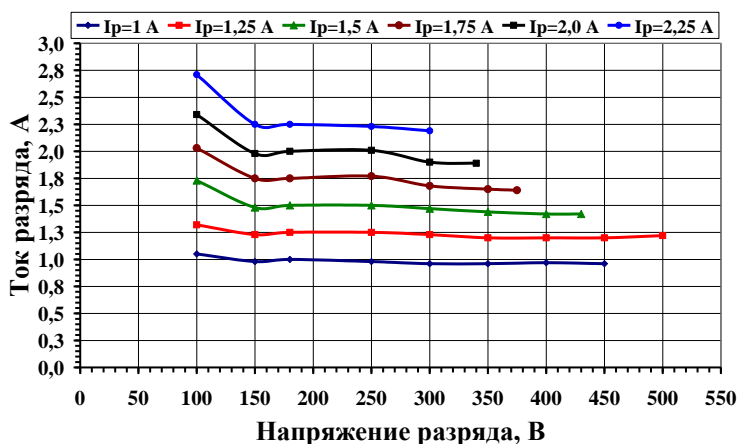


Рисунок 10 - Вольтамперные характеристики

разряда. Из графика видно, что ток разряда с повышением напряжения разряда незначительно снижается при напряжении разряда более 250 В, что наиболее вероятно обусловлено снижением эффективности процесса ионизации газа.

Зависимость тяги, цены тяги, удельного импульса и КПД двигателя ПлаС-40 представлены на рисунке 11. При повышении напряжения разряда тяга двигателя стабильно растет близко к линейной зависимости. Максимальное значение тяги зафиксировано при анодном расходе 2,58 мг/с и напряжении разряда 300 В и

составляет 42,5 мН. Минимальная цена тяги составила 12,5 Вт/мН при токе разряда 1,5 А и напряжении разряда 150 В. При максимальном напряжении разряда 500 В и мощности 625 Вт полный удельный импульс тяги, рассчитанный с использованием расхода, учитывающего поправку на давление в вакуумной камере, составил 1730 с. Существенный рост КПД происходит при повышении напряжения разряда до значения 250 В, после чего его значение стабилизируется около ~35% для расхода 1,32 мг/с и ~47% для расхода 2,58 мг/с. Стабилизация значения КПД при повышении напряжения разряда более 250 В происходит со снижением тока разряда (рисунок 10).

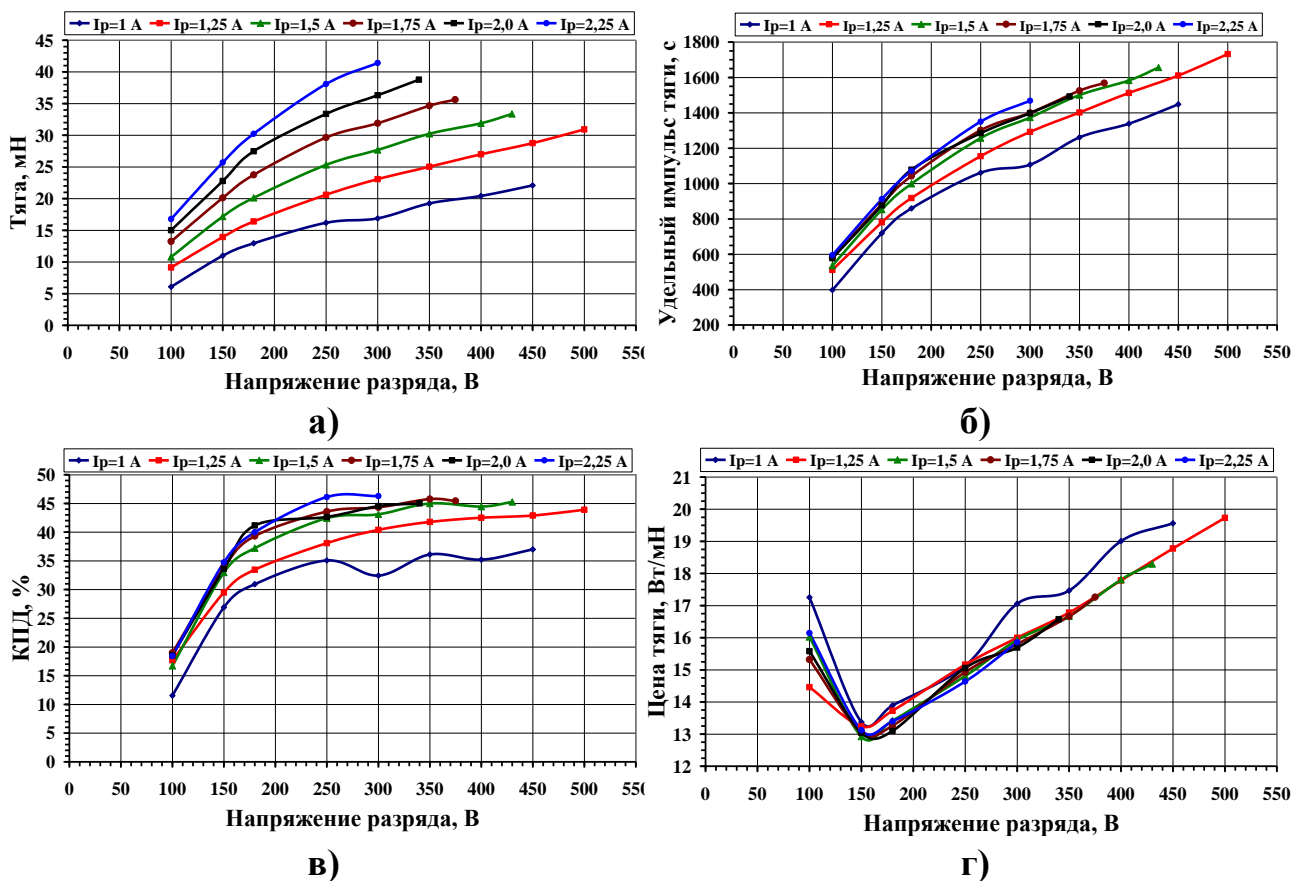


Рисунок 11 - Зависимость а) тяги, б) удельного импульса тяги, в) КПД и г) цены тяги от напряжения разряда

На рисунке 12 представлены зависимости среднеквадратичных амплитуд колебаний напряжения разряда и тока разряда от напряжения разряда. Как видно, с повышением напряжения разряда наблюдается резкое снижение колебаний тока

разряда (рисунок 12а)), минимум которых зафиксирован при напряжении разряда $U_d=150$ В. При том же значении напряжения разряда достигается и минимальная цена тяги. Колебания напряжения разряда с ростом напряжения изменяются незначительно (рисунок 12б)).

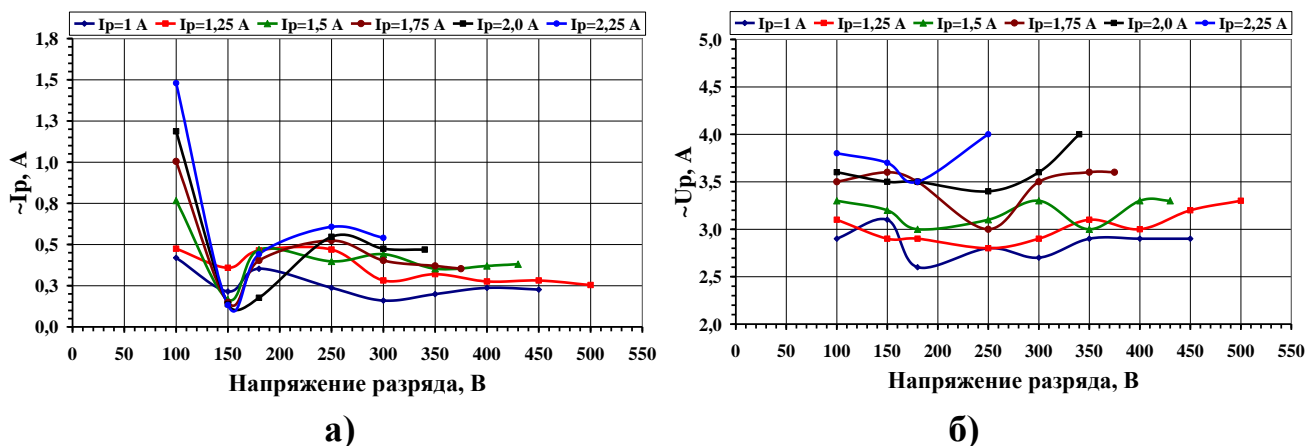


Рисунок 12 - Зависимость среднеквадратичных отклонений а) тока и б) напряжения разряда от напряжения разряда

В результате исследований ПлаС-40 установлено, что двигатель имеет широкий диапазон устойчивой работы в зависимости от магнитного поля в УК, высокие параметры достигаются при различных сочетаниях токов в катушках намагничивания (рисунок 13). При проверке устойчивости работы двигателя при изменении магнитного поля с оптимизацией по токам намагничивания на режиме при токе разряда $I_p=1,25$ А и напряжении разряда $U_p=180$ В ток в одной группе катушек поддерживался постоянным 1,82 А, тогда как в другой изменялся.

Исследования эффективности работы двигателя при изменении магнитного поля в УК (рисунок 14) при фиксированном расходе РТ показали, что на режимах работы с расходом рабочего тела менее 2 мг/с тяга двигателя возрастает близко к линейной зависимости с увеличением магнитного поля в канале и ростом разрядного напряжения соответственно. Отмечено резкое возрастание уровня тяги двигателя на

режиме работы при расходе РТ более 2 мг/с (соответствует $I_d=2,0$ А), что обусловлено сужением слоя ионизации и ускорения, а также смещением его к срезу РК, что в конечном итоге способствует снижению потерь ионов на стенках канала и улучшению фокусировки плазменной струи.

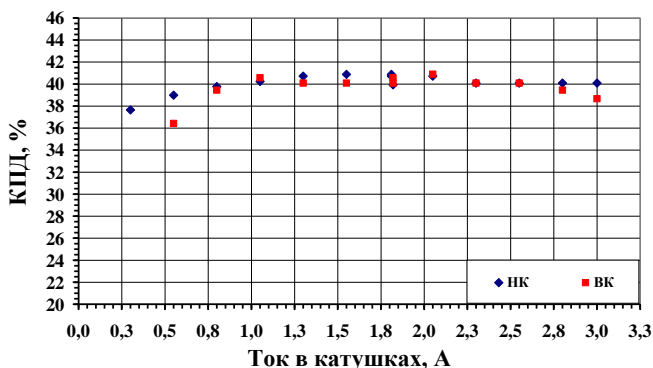


Рисунок 13 - Зависимость КПД двигателя от тока в катушках намагничивания

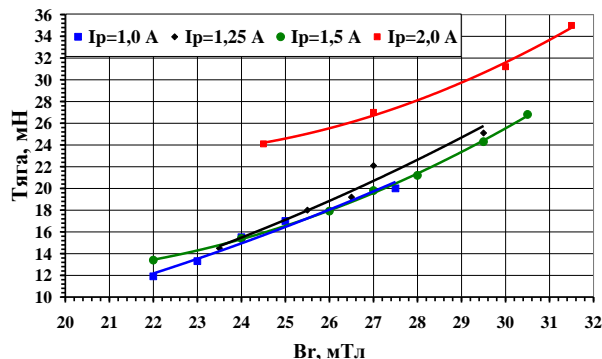


Рисунок 14 - Зависимость тяги двигателя от индукции магнитного поля в УК

Оценка эффективности использования РТ производилась по соотношению расхода рабочего тела к току разряда G_a/I_p (рисунке 15). Для двигателя ПлаС-40 $G_a/I_p > 1$, что является наиболее предпочтительным, так как при обеспечении полной ионизации подаваемого газа доля паразитного электронного тока мала. В то же время необходимо иметь в виду, что при неполной переработке атомов в ионы получают несколько завышенные значения G_a/I_p .

При испытаниях на одном из режимов при $G_a=1,8$ мг/с по измеренному ионному току I_i была определена величина сквозного электронного тока I_e , зависимость которого показана на рисунке 15б). Такая функция, как правило, монотонно спадает и для двигателя ПлаС-40 выходит на насыщение при $U_p > 400$ В. При насыщении соотношение G_a/I_d составляло 1,36.

На графике также представлено отношение электронного тока к току разряда (I_e/I_p), которое, как видно, не превышает 20%, что указывает на достаточно хорошую

организацию рабочего процесса ионизации и ускорения (рисунок 15б)). По результатам испытаний также был определен коэффициент ионизации РТ K_i , который изменяется в диапазоне от 0,70 до 0,86, что свидетельствует о неполной ионизации РТ. Необходимо также отметить, что при данных значениях коэффициента ионизации РТ (низких относительно значений, типичных для СПД) в двигателе ПлаС-40 достигается более высокие значения КПД (рисунок 11в)).

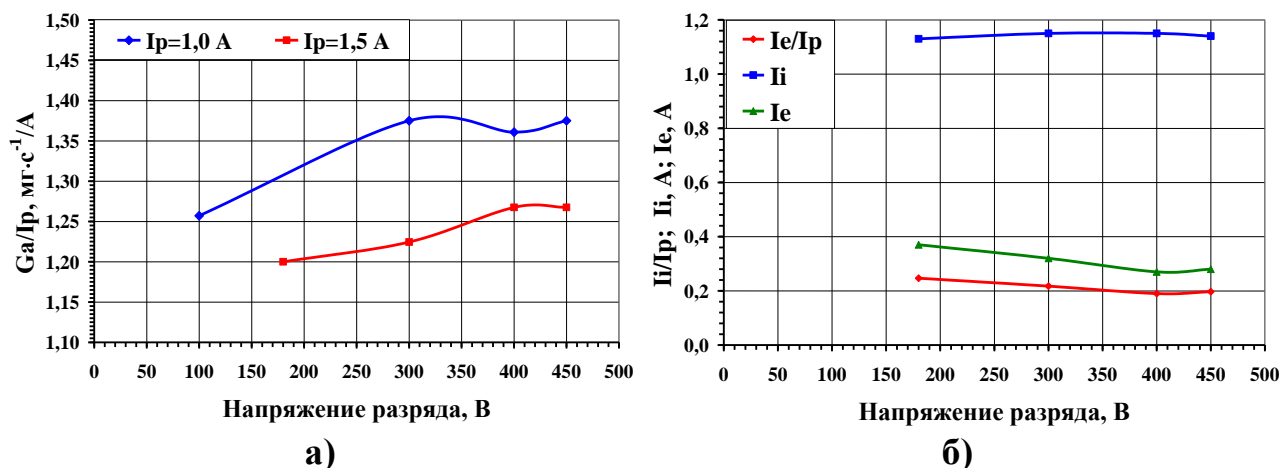
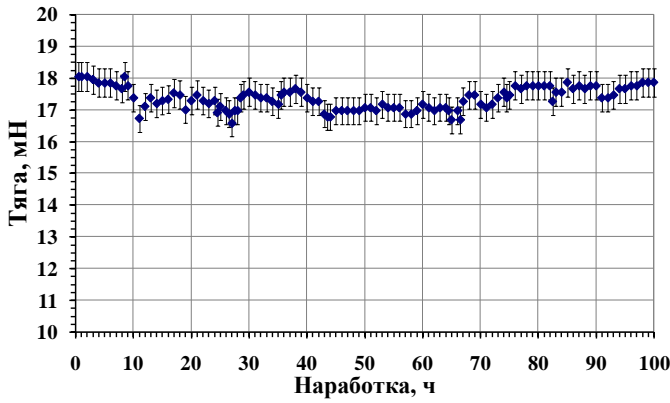
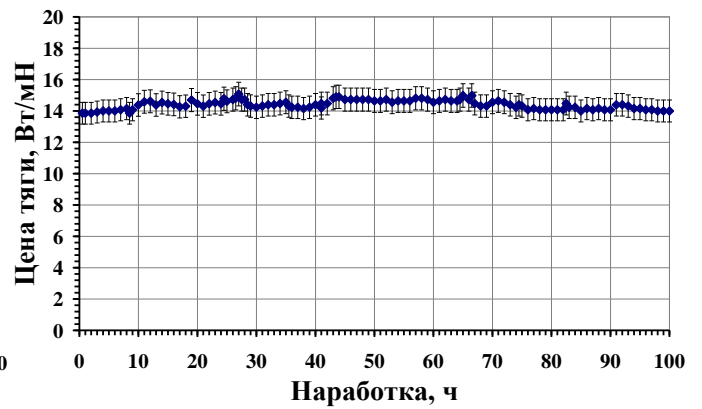


Рисунок 15 - Характеристики двигателя ПлаС-40: зависимости а) отношения G_a/I_p и б) ионного тока, электронного тока и его доли (при $G_a=1,8$ мг/с) от изменения U_p

Двигатель ПлаС-40 также прошел наработку длительностью 100 часов на режиме при напряжении разряда $U_p=200$ В и токе разряда $I_p=1,25$ А. Изменение тяги, цены тяги, удельного импульса и КПД двигателя в процессе длительной работы показано на рисунках 16 и 17. Средняя величина тяги в процессе длительной работы составила 17,1 мН, среднее значение удельного импульса тяги, рассчитанное с использованием расхода, учитывающего поправку на давление в вакуумной камере - 1000 с. Средняя величина полного КПД составила 34,7 %, цена тяги 14,4 Вт/мН. Двигатель ПлаС-40 за 100 часов выработал суммарный импульс 6,2 КН·с.

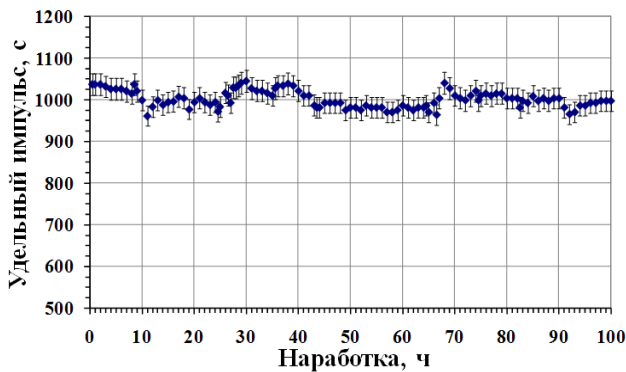


а)

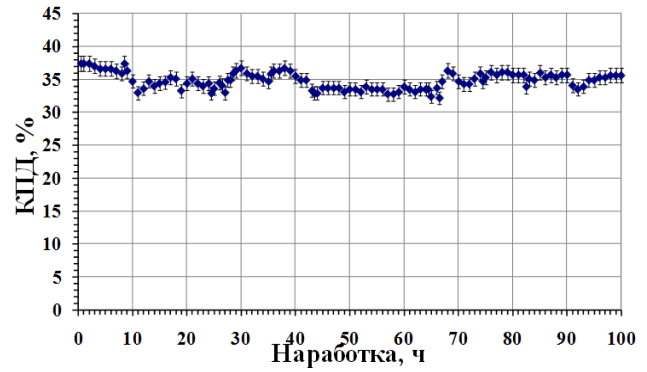


б)

Рисунок 16 - Параметры двигателя ПлаС-40 при длительной работе: зависимости а) тяги и б) цены тяги



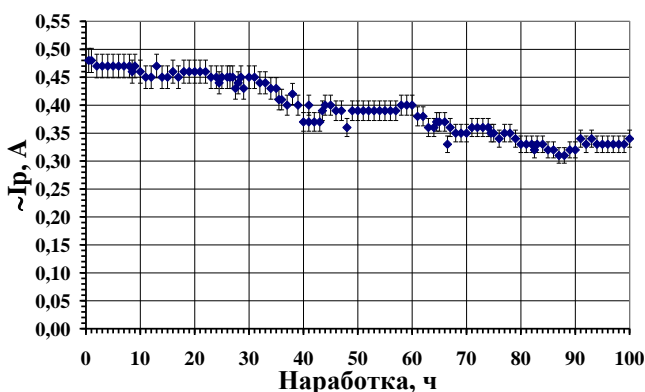
а)



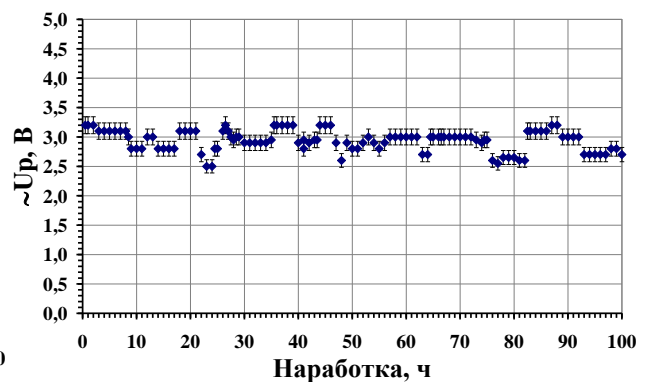
б)

Рисунок 17 - Параметры двигателя ПлаС-40 при длительной работе: зависимости а) удельного импульса тяги и б) КПД

В процессе наработки отмечено снижение колебаний тока разряда двигателя, что связано с начальной приработкой двигателя (рисунок 18). Ожидается последующая стабилизация среднеквадратичных отклонений колебаний тока разряда не более 0,35 А. Уровень колебаний напряжения разряда практически не изменился.



а)



б)

Рисунок 18 - Зависимость среднеквадратичных отклонений а) тока и б) напряжения разряда двигателя ПлаС-40 при длительной работе

После испытаний были проведены измерения глубины поясков эрозии РК двигателя. Измерения проводились в восьми сечениях. Средняя величина глубины эрозии после 100 ч наработки для наружного кольца, выполненного из керамики БПП-10, составила 2,5 мм, для внутреннего – 3,0 мм (рисунок 19).



Рисунок 19 - Внешний вид поясков эрозии РК двигателя ПлаС-40 с мерным эталоном №3 а) наружная и б) внутренняя стенки РК

3. Сравнительный анализ двигателя ПлаС-40 с аналогами

В ОКБ «Факел» разработан двигатель малой мощности СПД-50, который применяется в составе ЭРДУ «Канопус-В» [9]. Сравнительный анализ двигателей ПлаС-40 и СПД-50 показывает, что на одинаковых или близких режимах ПлаС-40 имеет повышенные на 8-10 % выходные параметры. Сравнительные характеристики двигателей малой мощности одного типоразмера, разработанных в ОКБ «Факел», представлены в таблице 2. Значения параметров и характеристик двигателей указаны с учетом мощности разряда и затрат мощности на создание магнитного поля, а также расхода рабочего тела через катод и поправки на уровень давления в вакуумной камере.

Таблица 2

Параметры двигателей малой мощности

Двигатель	СПД-50	ПлаС-40
Напряжение разряда, В	180	180
Ток разряда, А	1,20	1,25
Мощность разряда, Вт	220	225

Тяга, мН	14,0	17,0
Удельный импульс тяги, с	860	1010
КПД, %	26	37
Цена тяги, Вт/мН	16,0	13,8
Масса, кг	1,23	1,20
Наружный диаметр УК, мм	50	49
Габаритные размеры, мм (Объем, см³)	160×120×91 (1,75·10 ³)	167×100×87 (1,50·10 ³)

Кроме того, испытания двигателя ПлаС-40 показали возможность достижения уровня удельных параметров, характерного для двигателей большего типоразмера. Для сравнения в таблице 3 приведен разработанный в ОКБ «Факел» для компании AeroJet двигатель СПД-70, выполненный по классической схеме СПД.

Таблица 3

Параметры двигателей средней мощности

Двигатель	СПД-70	ПлаС-40
Параметр		
Напряжение разряда, В	300	300
Ток разряда, А	2,23	2,20
Мощность разряда, Вт	669	652
Тяга, мН	39,2	41,5
Удельный импульс тяги, с	1468	1470
КПД, %	43	46
Цена тяги, Вт/мН	17,0	15,5
Масса, кг	2,0	1,2
Наружный диаметр УК, мм	70	49
Габаритные размеры, мм (Объем, см³)	198×146×98 (2,8·10 ³)	167×100×87 (1,5·10 ³)

4. Заключение

В результате проведенной массо-энергетической оптимизации конструктивной схемы стационарного плазменного двигателя разработан новый плазменный двигатель с полым магнитным анодом малой мощности ПлаС-40, обеспечивающий повышенные в сравнении с аналогами на 10 % удельные параметры и характеристики.

В ходе исследований двигателя с полым магнитным анодом ПлаС-40 установлено, что новый двигатель имеет устойчивый характер работы в режимах при мощности разряда от 100 до 650 Вт с напряжением разряда от 100 до 500 В и током разряда от 1,00 до 2,25 А, а также и при длительной работе. Высокие тяговые параметры достигаются при различных сочетаниях токов в катушках намагничивания.

На двигателе ПлаС-40 достигнуты высокие удельные параметры, которые обеспечиваются двигателем бóльшего типоразмера, как, например, SPT-70. Применение новых двигателей типа ПлаС для аналогичных задач, выполняемых СПД, позволяет снизить массу и занимаемый ими объем в составе КА на ~40%.

На основе полученных результатов исследований и массо-энергетической оптимизации конструкции ПлаС-40 в будущем предполагается последующее совершенствование конструктивной схемы двигателей типа ПлаС, а также разработка моделей бóльшего типоразмера, как, например, ПлаС-55 и ПлаС-85 и исследование их параметров и характеристик.

Библиографический список

1. Гопанчук В.В., Потапенко М.Ю. Электрореактивные двигатели для малых космических аппаратов // Вестник Российского государственного университета им И. Канта, 2012. В. 4. С. 60-67.
2. 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, Germany, September 11-15, 2011.
3. Гопанчук В.В., Никулин Н.М., Потапенко М.Ю. Оптимизация магнитных систем электрореактивных двигателей // Вестник Московского авиационного института, 2011. Т. 18. №1. т.18.С. 64-74.
4. Гопанчук В.В., Потапенко М.Ю. Исследование конфигурации разрядной камеры гибридного плазменного двигателя // Электронный журнал «Труды МАИ». №42. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=24264> (дата обращения: 25.09.2013).
5. Плазменный ускоритель с замкнутым дрейфом электронов. Патент 2447625 Рос. Федерация. № 2010110866; заявл. 22.03.2010; опубл. 10.04.2012, Бюл. №10.
6. Гопанчук В.В., Потапенко М.Ю. Повышение эффективности газораспределения в ускорительном канале электрореактивного двигателя // Вестник Сибирского государственного университета имени академика М.Ф. Решетнева, 2011. В. 36 (3). С. 104-109.
7. Гопанчук В.В., Потапенко М.Ю. Исследование условий газозлектрического пробоя в проточной части электрических изоляторов систем подачи рабочего тела

электроракетных двигателей // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта, 2010. В. 4. С. 131-137.

8. Газоэлектрическая развязка тракта подачи рабочего тела плазменного ускорителя. Патент 2410742 Рос. Федерация, №2009149363; заявл. 29.12.2009, опубл. 27.01.2011, Бюл. №3.
9. Gorbunov A.V., Khodnenko V.P., Khromov A.V., Murashko V.M., Koryakin A.I., Zhasan V.S., Grikin G.S., Galayko V.N., Katasonov N.M.. Vernier Propulsion System for Small Earth Remote Sensing Satellite “Canopus-V” // EPC-2011-002, 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011.