

УДК 629.7.036.74

Исследование конфигурации разрядной камеры гибридного плазменного двигателя

В.В. Гопанчук, М.Ю. Потапенко

Представлены результаты исследований влияния конфигурации разрядной камеры на работу и характеристики гибридного плазменного двигателя с целью повышения стабильности удельных параметров и характеристик в моделях различного типоразмера в диапазоне рабочих мощностей от 100 Вт до 2,3 кВт, включая режимы работы при высоких разрядных напряжениях.

Ключевые слова: холловский электрореактивный двигатель; гибридный плазменный двигатель; разрядная камера; колебания тока.

Введение

К гибридным плазменным двигателям (ГПД), рассматриваемым в данной статье, относятся двигатели с замкнутым дрейфом электронов, работающие при сочетании принципов механизма и процесса ионообразования и ускорения, действующих как в стационарных плазменных двигателях (СПД), так и в двигателях с анодным слоем (ДАС) [1]. Работа такого двигателя заметно отличается от работы классического СПД, который многие годы успешно используется в космической технике. В связи с расширением круга задач, в которых применяется СПД, необходимо совершенствование схемы и конструкции двигателя с тем, чтобы повысить его характеристики и устойчивость рабочих процессов в нем. Одной из таких возможностей является переход к гибридной схеме конструкции, которая ранее уже была апробирована [2]. Вместе с тем, особенности работы такого двигателя и влияние различных параметров конструкции и рабочего режима на характеристики гибридного двигателя являются пока недостаточно изученными. В частности, недостаточно изучено влияние конфигурации и размеров РК гибридного двигателя на его работу и характеристики. С учетом изложенного целью данной работы являлось исследование влияния конфигурации РК ГПД на его работу и характеристики, выбор оптимальной геометрии ускорительного канала (УК) с целью уменьшения неустойчивости рабочих процессов в УК и стабилизации удельных параметров и характеристик.

Перспективность ГПД была подтверждена разработкой и испытаниями двигателя SPT-1, осуществленной в ОКБ «Факел» [2]. Было показано, что такой двигатель эффективно работает при повышенных разрядных напряжениях до и более 1 кВ. Похожие конструктивные схемы были реализованы фирмами Busek и Aerojet в США [3], а также в исследовательском центре имени М.В.Келдыша в холловских двигателях с комбинированной «металл-керамической» РК [4]. Больше того, двигатели таких схем были приняты в качестве базовых для параметрического ряда двигателей, разрабатываемых в названных фирмах и исследовательском центре. Таким образом, исследование влияния различных факторов на работу и характеристик таких двигателей является актуальным.

1. Исследование особенностей работы и характеристик модели ГПД SPT-1

Одним из объектов, исследовавшихся в данной работе, является модель упоминавшегося выше гибридного двигателя SPT-1 (рис. 1), прошедшего серию исследовательских испытаний как на стендах ОКБ «Факел», так и успешные демонстрационные испытания на стендах центра NASA имени Джона Х. Гленна (США). В отличие от классического СПД данная модель имела протяженный полой анод-газораспределитель, стенки которого также образовывали большую часть РК в ее глубине.

В конструкции SPT-1 были реализованы следующие основные геометрические размеры РК: $b_k=15$ мм, $L_k=26,5$ мм, $b_{n_0}=15$ мм и $b_a=20$ мм. Таким образом, основные геометрические размеры РК для SPT-1 могут быть описаны следующими характеристическими соотношениями:

$$1 \leq \frac{L_k}{b_k} < 2; \quad \frac{L_k}{L_B} > 1; \quad \frac{b_{n_0}}{b_k} = 1; \quad \frac{b_k - b_{n_0}}{b_k} = 0 \quad (1)$$

где b_k - ширина РК; L_k - длина РК; b_{n_0} - ширина РК на входе в зону ионизации; b_a - ширина РК у анода; L_B - полуширина части распределения индукции \mathbf{B} магнитного поля со стороны РК до сечения $V=V_{r,max}$.

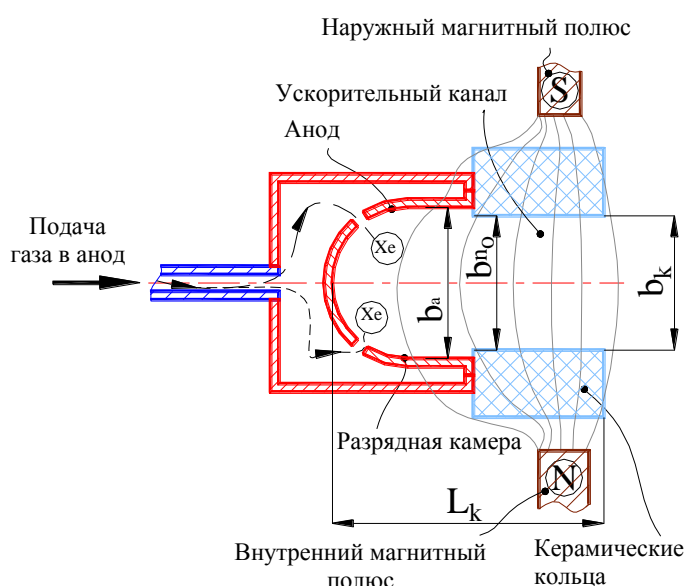


Рис. 1. Конструктивная схема ГПД SPT-1 с комбинированной «металл-керамической» РК, часть которой образована стенками полого анода-газораспределителя

Характеристические соотношения (1) показывают, что в конструктивной схеме SPT-1 сочетаются различные критерии, типичные как для СПД [5, с.143], так и двигателя с анодным слоем (ДАС), что и подтверждает гибридизацию SPT-1.

Как следует из характеристических соотношений, описывающих конфигурацию РК и УК, модель SPT-1 имеет меньшее расстояние от анода до среза РК ($1 \leq L_k/b_k < 2$), чем в классическом СПД, что позволяет реализовать «непосредственный» контакт ускоряемого потока со стенками ($(b_k - b_{n_0})/b_k = 0$). Видно также, что величина минимального расстояния близлежащих участков анода до зоны ионизации и ускорения в ГПД двигателе SPT-1, которая может быть определена по формуле $L_A \min = (b_a - b_{n_0})/2$, также меньше и составляет 2,5 мм. Кроме того, как будет показано позже, при такой конструктивной схеме появляется также возможность существенного изменения топологии магнитного поля в пределах РК ($L_k/L_B > 1$). Для сравнения с характеристиками этой модели использовались характеристики широко известных двигателей типа СПД-100 и PPS 1350R.

Одним из показателей, характеризующих работу двигателя с замкнутым дрейфом электронов, является уровень колебаний разрядного тока и разрядного напряжения в его разрядной цепи. Для рабочих режимов классических СПД, например, для двигателя СПД-100, работающего в диапазоне расходов от 2,50 до 4,66 мг/с, характерны немонотонные колебания разрядного тока при изменении разрядного напряжения (рис.2а), которые преимущественно характеризуются большой амплитудой (до 2,0 А и более) и частотой 20...40 кГц. Эти колебания в конечном итоге являются предпосылкой к переходу в неустойчивые режимы работы. Колебания разрядного напряжения при этом могут достигать 3-5 В (рис.2б), что в конечном итоге также является предпосылкой высокой вероятности срыва режима работы СПД и переходу в неустойчивые режимы работы.

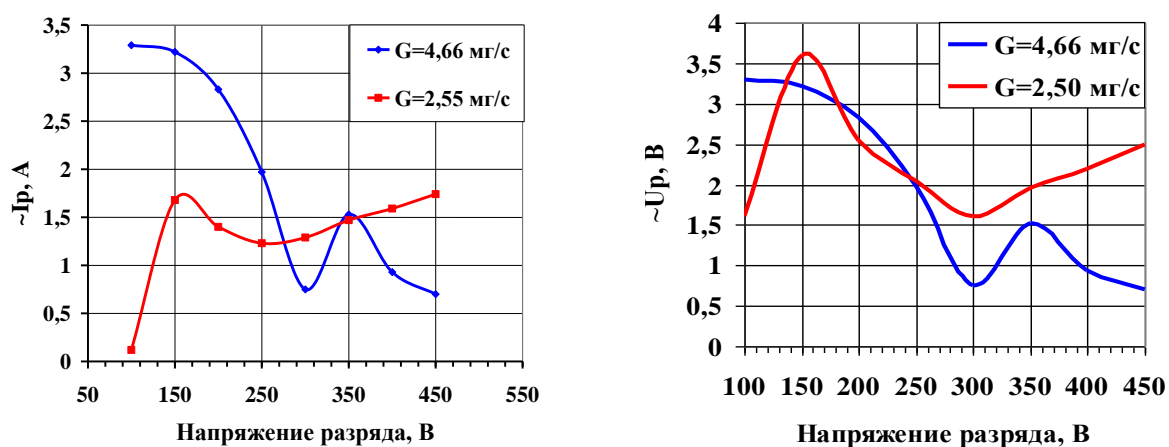


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичной а) амплитуды I_p и б) амплитуды U_p от напряжения разряда СПД-100

Аналогичный характер поведения колебаний разрядного тока получен и для двигателя PPS 1350R, разработанного в процессе совместных работ с французской фирмой «SEP» (позже вошедшей в состав аэрокосмической фирмы «Snecma»), модель которого PPS 1350QMR была успешно квалифицирована в ОКБ «Факел» [6, 7].

Сравнительный анализ параметров работы исследовательской модели двигателя СПД-100 в высоковольтном режиме в диапазоне расходов от 2,42 до 5,38 мг/с с параметрами демонстрационной модели ГПД SPT-1 показывает, что на режимах их работы близких по току разряда средний уровень среднеквадратичной амплитуды колебаний тока $\sim I_p$ в СПД-100 значительно больше, чем зафиксированные для SPT-1 (рисунок 3). При этом в СПД-100, а также в моделях СПД-100В и PPS 1350, реализованы следующие размеры элементов РК: $b_k=15,5$ мм, $L_k=23...26,5$ мм, $b_{но}=15,5$ мм и $b_a=15,5$ мм.

Как видно из приведенного рисунка, с ростом разрядного напряжения значения среднеквадратичной амплитуды колебаний $\sim I_p$ возрастают. Тогда как в SPT-1 наблюдается их уровень значительно ниже и практически не изменяется.

Полученные данные свидетельствуют о том, что рабочие процессы в модели SPT-1 значительно отличаются от соответствующих процессов в двигателе СПД-100. Поэтому было проведено исследование влияния различных факторов на интегральные характеристики, результаты которых представлены ниже.

С целью определения степени влияния протяженности диэлектрических стенок РК, расположенных в зоне ускорения плазмы, были проведены исследовательские испытания. Испытания проводились в два этапа на выбранных режимах при мощности 2,3 кВт в одинаковых окружающих условиях. На первом этапе испытаний в составе ГПД SPT-1 были вначале установлены керамические кольца длиной 12 мм таким образом, что относительно внутренней плоскости наружного магнитного полюса выступание составляло 8 мм. На втором этапе был установлен второй комплект колец длиной 9,5 мм таким образом, что их выступание уменьшилось на 2,5 мм. Обе пары колец были изготовлены из керамики и при установке в двигатель образовывали УК постоянной ширины 15 мм. При испытаниях на различных режимах магнитное поле поддерживалось стабильным (~ 27 мТл) с целью

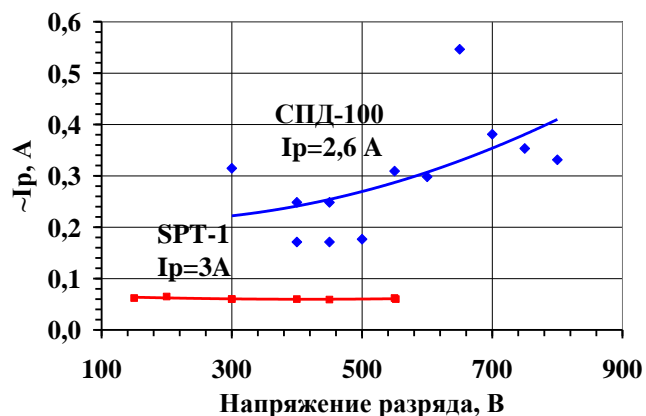


Рис.3. Зависимость среднеквадратичной амплитуды I_p от напряжения разряда двигателя СПД-100 и SPT-1

обеспечения постоянства расположения магнитной линзы [8] в рабочем межполюсном промежутке и, соответственно, местоположения зон эрозии материала стенок РК.

На рисунке 4 представлены результаты испытаний, из которых следует, что протяженность стенок РК в зоне ускорения существенного влияния на тягу при постоянной рабочей мощности не оказывает, что подтверждает ее зависимость преимущественно от ширины УК и удельного расхода в нем. Однако при этом тестовые контрольные включения гибридного двигателя на режимах с увеличенной мощностью до 2,7 и при 3,0 кВт продемонстрировали увеличение уровня тяги при длине керамических колец 12 мм.

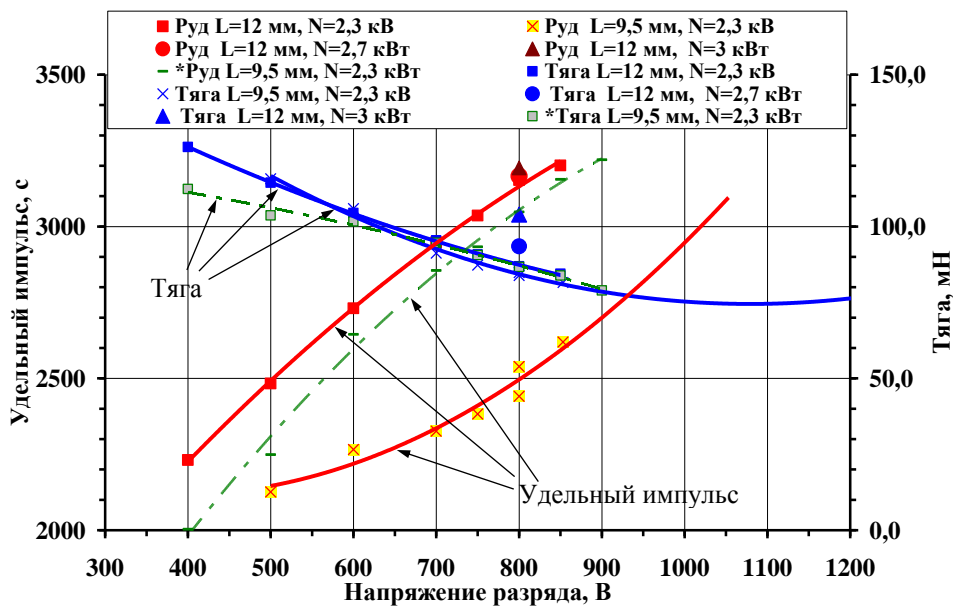


Рис.4. Зависимость тяги и удельного импульса от напряжения разряда при различной протяженности керамических колец РК гибридного двигателя SPT-1 (*-переход к резко расширяющейся геометрии УК)

На удельный же импульс влияние оказалось существенным. Укорочение длины стенок РК в зоне ионизации и ускорения на 2,5 мм, изготовленных из керамики, привело к необходимости увеличения разрядного напряжения на ~37,5% с целью обеспечения одинакового удельного импульса. Таким образом, изменение удельного импульса на единицу длины зоны контакта ускоренного потока со стенками РК (зоны эрозии) составляет ~200 с/мм. Однако данное снижение параметров компенсируется при переходе к резко расширяющейся геометрии УК ($b_{n_0}/b_k = 11/15$). Подобный эффект увеличения параметров при переходе к резко расширяющейся геометрии УК ($b_{n_0}/b_k = 8/11$) зафиксирован при испытаниях маломощной модели прототипа двигателя ПлаС-40.

Тестовые же контрольные включения двигателя SPT-1 на режимах увеличенной мощности при 2,7 и 3,0 кВт продемонстрировали также увеличение удельного импульса.

Кроме того, с целью определения влияния удельного расхода в УК на основные параметры и характеристики были также проведены исследовательские испытания гибридного двигателя SPT-1. При таких испытаниях на разных этапах применялись различные керамические кольца, изготовленные из одного материала, но с переменными геометрическими размерами, образующими УК в зоне ионизации и ускорения и изменяющие его ширину при сохранении остальной конфигурации конструкции модели. На первом этапе были установлены кольца, образующие УК шириной 13 мм, на втором этапе – 14 мм. На третьем этапе были установлены кольца, формирующие резко расширяющуюся геометрию канала в направлении среза РК: если в зоне ускорения в области среза ширина УК составляет 15 мм, то на входе и в самой зоне ионизации ширина составляет всего 11 мм [12], причем переход между этими участками выполнен в виде ступеньки в поперечном направлении по радиусу. Известно, что при уменьшении ширины УК уровень требуемой оптимальной индукции магнитного поля возрастает, исходя из соотношения $V_{opt} \sim 1/R_L$, где R_L – условный ларморовский радиус [5].

На рис. 5 представлены полученные данные при испытаниях модели SPT-1 с различными вариантами ширины РК. В качестве сравнения там же приведены результаты испытаний двигателя СПД-100 на высоковольтных режимах.

Следует также учитывать, что одинаковый удельный расход [9] в сравниваемых двигателях

достигался в УК различной протяженности. Так, если в СПД-100 реализован традиционный цилиндрический канал шириной 15 мм и протяженностью ~25 мм, который определяется участком от анода, через который осуществляется впрыск рабочего тела, до среза РК, то в двигателе SPT-1 протяженность УК выполнена только в выходной его части, образуемой парой керамических колец, и составляет ~12 мм. При этом анодная полость на входе в зону ионизации имеет несколько большую ширину ~20 мм при глубине анодной полости ~18 мм, которая на удельный расход влияния не оказывает.

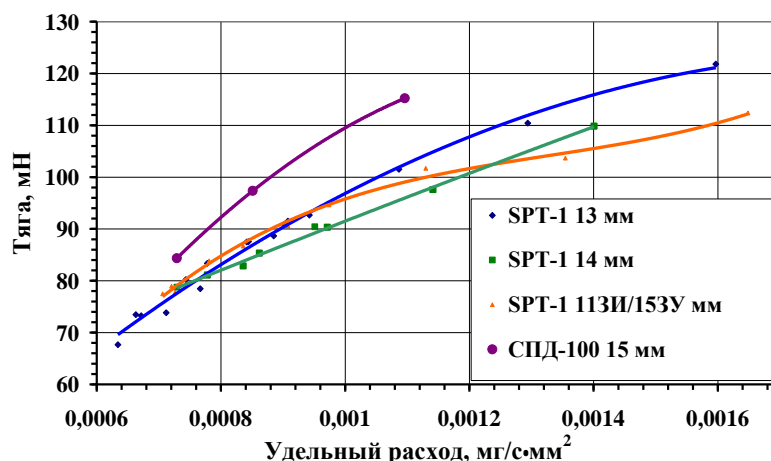


Рис.5. Зависимости тяги от удельного расхода высоковольтных двигателей СПД-100 и SPT-1 при мощности N=2,3 кВт

Как следует из результатов испытаний, при увеличении удельного расхода при неизменной ширине канала тяга различных двигателей в первом приближении пропорционально увеличивается, что соответствует известным типовым зависимостям параметров подобия. Отличительный характер имеет зависимость исследуемых параметров в случае переменной ширины канала, которая более пологая, что свидетельствует о снижении скорости изменения тяги при повышении удельного расхода. Так, для двигателя SPT-1 в области меньших значений удельного расхода достигается наибольшая тяга, которая, однако, при последующем увеличении удельного расхода несколько снижается и становится меньше, чем тяга, достигнутая на кольцах, формирующих каналы с меньшей шириной.

Анализ влияния ширины УК на достигаемые удельные импульсы (рис. 6) показывает, что более высокие значения удельного импульса достигаются на режимах с большим удельным расходом, что также хорошо верифицируется с теоретическими расчетами.

Следует отметить, что зависимость удельного импульса от удельного расхода при использовании переменной ширины УК несколько отличается от типичных для вариантов каналов с постоянной шириной, и которая имеет более крутой характер изменения.

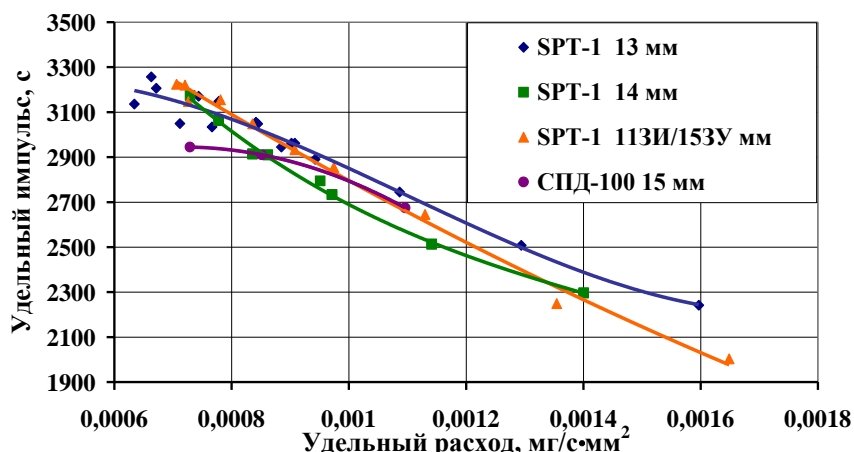


Рис.6. Зависимости удельного импульса от удельного расхода высоковольтных двигателей СПД-100 и SPT-1 при мощности N=2,3 кВт

Сравнительный анализ полученных данных с параметрами другого двигателя СПД-100, прошедшего испытания также на высоковольтных режимах 700-750 В, показывает близкое подобие исследуемых зависимостей.

2. Исследование особенностей работы и характеристик ГПД ПлаС-40

Были проведены также исследования особенностей работы и характеристик модели ГПД прототипа двигателя ПлаС-40 меньшего типоразмера. В этой модели (рис.7) традиционные тонкостенные кольцевые магнитные экраны, объединенные с тыльной стороны сплошной перемычкой [10], были функционально заменены магнитным рефлектором [11], входящим в состав полого анода и электрически изолированным от остальных элементов конструкции магнитной системы. Полюс анода с магнитным

рефлектором позволяет обеспечить в РК оптимальную структуру магнитного поля с повышенным градиентом радиальной составляющей магнитной индукции вдоль УК (при прочих равных условиях продольный компонент градиента радиальной составляющей индукции магнитного поля может быть увеличен в 1,5-2 раза).

В конструкции прототипа ГПД ПлаС-40 были реализованы следующие основные геометрические размеры РК: $b_k=11$ мм, $L_k=15$ мм, $b_{n0}=9$ мм и $b_a=10$ мм.

Реализованная конструктивная схема РК в прототипе ГПД прототипа ПлаС-40, представленного на рисунке 4, описывается другим набором характеристических соотношений его основных геометрических размеров (2):

$$1 \leq \frac{L_k}{b_k} < 1,5; \quad \frac{L_k}{L_B} > 1; \quad \frac{b_{n0}}{b_k} < 1; [12] \quad 0 < \frac{b_k - b_{n0}}{b_k} < 1. \quad (2)$$

Как видно, для ПлаС-40 характеристические соотношения его основных геометрических размеров отличаются от конфигурации РК и УК модели SPT-1. Кроме того, три критерия являются строго индивидуальными.

Как и в случае SPT-1, для модели гибридного двигателя ПлаС-40 характерна более «короткая» камера, чем в классическом СПД (если считать длину РК от анода до среза РК), а также повышенная вероятность контакта ускоряемого потока со стенкам РК ($0 < (b_k - b_{n0})/b_k < 1$). Величина же минимального расстояния от близлежащих участков анода до зоны ионизации и ускорения в таком гибридном двигателе также определяется по формуле: $L_A \min = (b_a - b_{n0})/2$. Для

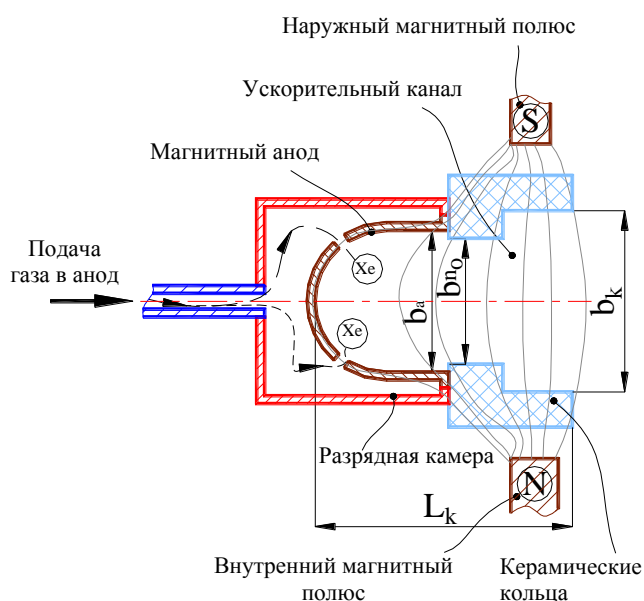


Рис.7. Конструктивная схема полого магнитного анода прототипа гибридного двигателя ПлаС-40

прототипа ПлаС-40 величина минимального расстояния от анода до зоны ионизации и ускорения составляет 0,5 мм.

Как видно, величина минимального расстояния от анода до зоны ионизации и ускорения в различных моделях гибридных двигателей составляет до 10 мм, что, однако, в дальнейшем требует проведения дополнительных работ по ее уточнению.

Для определения общих тенденций поведения колебаний разрядного тока при повышении разрядного напряжения (при постоянной мощности сопровождающимся, как правило, снижением разрядного тока) был проведен сравнительный анализ параметров маломощных СПД с другим гибридным двигателем меньшего типоразмера, например, с $\varnothing 40$ мм посередине УК, на соизмеримых режимах работы относительно небольшой мощности до 250 Вт. Сравнительному анализу подвергались двигатели параметрического ряда СПД, разработанные и изготовленные в разные периоды времени, и экспериментальная модель прототипа гибридного двигателя ПлаС-40, имеющего РК, образованную в глубине полостью магнитного анода-газораспределителя. Так, если модуль М50 был изготовлен в 80-х годах, то новая версия двигателя СПД-50 была разработана в последние годы в рамках работ по разработке КДУ КА «Канопус-В» для серии малых КА. Оба двигателя прошли наземную отработку на стендах ОКБ «Факел». Конструкции модуля М50 и двигателя СПД-50 базируются на следующих основных геометрических размерах РК: $b_k=9,5$ мм, $L_k=19\dots 20$ мм, $b_{no}=9,5$ мм и $b_a=9,5$ мм.

Сравнительный анализ поведения колебаний тока разряда по их среднеквадратичным значениям амплитуды, проведенный в диапазоне разрядных напряжений от 70 до 175 В, показывает (рис.8), что при повышении напряжений разряда в модуле М50 наблюдается резкое увеличение колебаний тока разряда, тогда как для прототипа ПлаС-40 уровень колебаний остается относительно низким и стабильным во всем диапазоне разрядных напряжений.

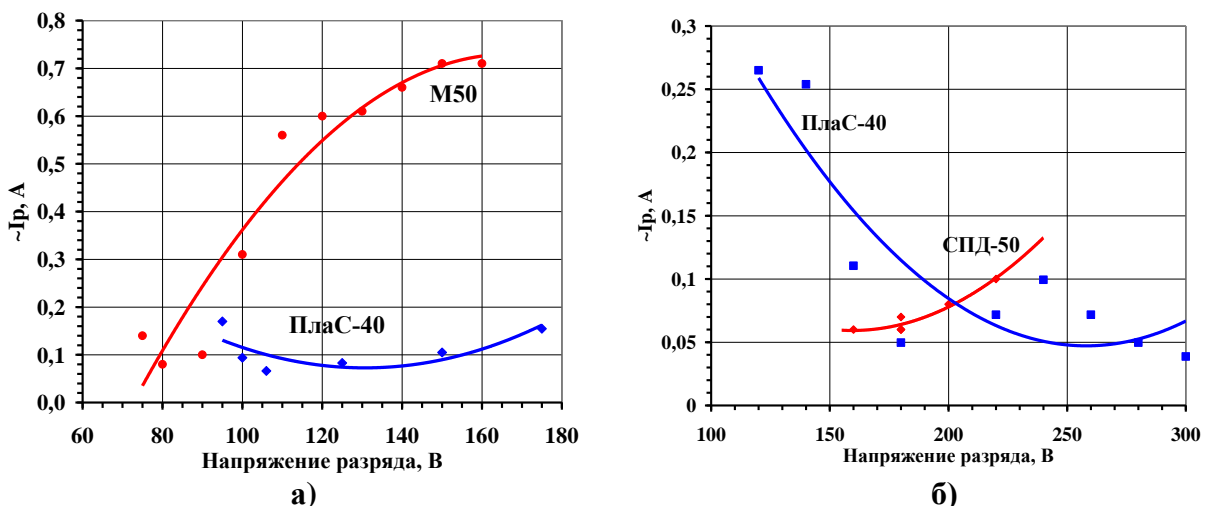


Рис.8. Зависимость среднеквадратичной амплитуды колебаний тока $\sim I_p$ от напряжения разряда а) ПлаС-40 и М50 при $I_p=2$ А и б) ПлаС-40 и СПД-50 при $I_p=1,25$ А

На режимах работы с более низким током разряда 1,25 А при повышении разрядного напряжения в двигателе СПД-50 происходит рост среднеквадратичной амплитуды колебаний разрядного тока, тогда как в прототипе ПлаС-40 наблюдается их резкое снижение, что более

предпочтительней для перспективных разработок высоковольтных ЭРД из-за меньших рисков, обусловленных нестабильной работой.

Одним из известных технических решений, позволивших уменьшить колебания в разрядной цепи, является формирование в УК структуры магнитного поля, при которой в УК радиальная составляющая индукции магнитного поля нарастает в направлении от анода к срезу РК [5, с.141]. Или, иначе говоря, путем формирования и обеспечения магнитного поля в УК с гарантированным положительным продольным градиентом по потоку газа. Такое техническое решение в свое время позволило стабилизировать мелкомасштабные колебания в разряде и повысить в целом эксплуатационные характеристики ускорителя.

Таким образом, ускоритель с гибридной схемой РК имеет предельно реализуемый минимальный диаметр УК, так как стенки зоны ионизации выполнены практически по радиусу и их масштабное уменьшение ограничено средней длиной свободного пробега нейтрала в пристеночной зоне. Очевидное данное преимущество дает сужение толщины стенок РК, охватывающих полый анод-газораспределитель, и расширение рабочего объема РК в радиальном направлении.

Известные конструктивные схемы, реализованные в СПД и ДАС, базируются на ускорителе плазмы с довольно протяженным УК цилиндрической формы, что предопределяет одинаковое расстояние между кольцеобразными стенками УК как в зоне ионизации, так и в зоне ускорения, как по глубине УК в целом, так и в азимутальном направлении, что ограничивает возможности оптимизации процессов независимо в каждой из этих зон. Так, если для эффективной ионизации оптимальная геометрия УК должна обеспечивать высокую плотность рабочего газа и плавное падение потенциала в зоне ионизации, то в зоне ускорения в первую очередь должны быть обеспечены высокий градиент потенциала и пониженная плотность разрядного тока.

Проведенные испытания прототипа двигателя ПлаС-40 и полученные в ходе испытаний данные, также как и проведенные исследовательские испытания более мощного двигателя SPT-1, подтвердили высокую стабильность (слабую чувствительность) основных параметров и характеристик гибридных двигателей даже при существенных изменениях магнитного поля, а также возможность достижения высоких интегральных характеристик при различных комбинациях токов запитывания источников намагничивания, что позволяет выбирать наиболее оптимальные сочетания ампер-витков исходя из различных конструктивных критериев, например, минимизации массы компонентов ЭРД или возможность включения всех источников намагничивания, соединенных между собой последовательно в разрядную цепь электрореактивного двигателя. Наиболее вероятной

причиной более стабильной работы моделей гибридного двигателя является наличие в его конструктивной схеме участков анода максимально приближенных к зоне ионизации и ускорения L_A .

Зафиксированная при испытаниях стабильная и устойчивая работа гибридных двигателей различного типоразмера и мощности при изменении магнитного поля в широком диапазоне, является неприсущей серийным двигателям типа СПД, работающим, как правило, при более «острых» магнитных полях. Стабильность интегральных параметров при изменении других рабочих параметров особенно важна при разработке многорежимных двигателей, работа которых изначально предполагает устойчивое функционирование на нескольких режимах.

При исследовательских испытаниях на прототипе ПлаС-40 были проведены экспериментальные работы по определению возможностей предельной минимизации внутреннего рабочего объема и определения путей по повышению эффективности подачи и распределения рабочего тела в УК (рис.9)

Для этого в модели была предусмотрена возможность изменения глубины (L_k) и, следовательно, и объема РК за счет внутреннего и наружного промежуточных колец, устанавливаемых между соответствующими торцами полого магнитного анода и керамическими кольцами УК, как показано на рисунке 9.

Для испытаний промежуточные кольца были изготовлены в вариантах из нержавеющей стали и электротехнической стали, что позволяло кроме изменения внутреннего рабочего объема зоны подачи рабочего тела, определяемого линейными размерами L_k и b_a , одновременно изменять также и структуру магнитного поля в УК, в особенности в зонах ионизации и ускорения, а также в местах впрыска рабочего тела в РК.

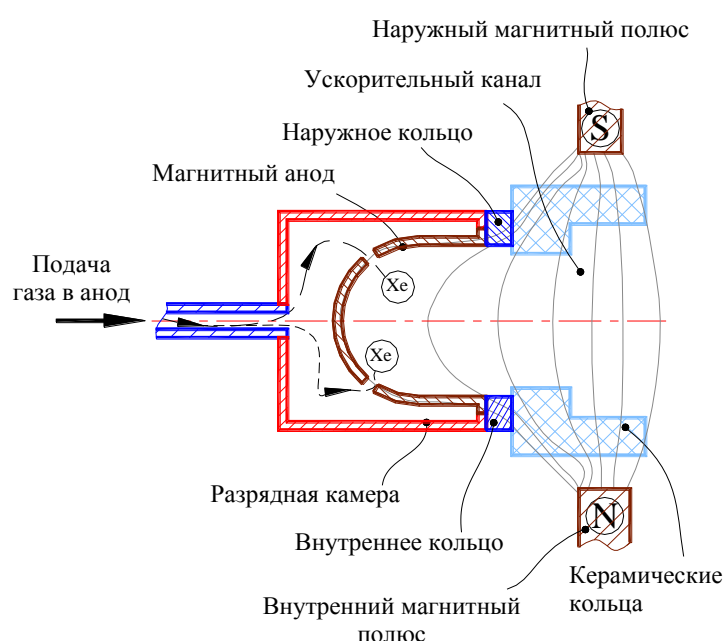


Рис.9. Конструктивная схема полого магнитного анода с промежуточными кольцами

В исходной конфигурации модель была испытана без промежуточных колец, когда объем полости смешения рабочего тела в РК был минимален и составлял $V_{рк}=7,3 \text{ см}^3$ при глубине анодной полости всего 6 мм. При этом площадь внутренней рабочей поверхности анода, на которую происходит сток электронов - замыкается разрядная цепь, составляла $S_a=25,5 \text{ см}^2$. Поскольку геометрия керамических колец РК не изменялись, а также их расположение относительно магнитных полюсов, то объем между ними допускается не учитывать (который составляет $V_{кзипу}=8,1 \text{ см}^3$).

Продольные магнитные зазоры в исходном варианте были: между внутренним анодным торцом и обращенной к нему близлежащей плоскостью внутреннего магнитного полюса магнитный зазор составлял $\delta_{a+вп}=0,5 \text{ мм}$, а между наружным анодным торцом и обращенной к нему близлежащей плоскостью наружного магнитного полюса магнитный зазор был равен $\delta_{a+нп}=1,5 \text{ мм}$.

Оценка эффективности использования рабочего тела производилась по известному соотношению \dot{m}_a / I_p (рис.10). Если $\dot{m}_a / I_p > 1$, что является наиболее предпочтительней, то в этом случае мала доля паразитного электронного тока при обеспечении полной ионизации подаваемого рабочего газа. Анализ интегральных характеристик показал, что полученные несколько завышенные значения \dot{m}_a / I_p вероятней всего и обусловлены недостаточно эффективным использованием рабочего тела.

При испытаниях на одном из режимов при $\dot{m}_a = 1,8 \text{ мг/с}$ по измеренному ионному току (I_i) была определена величина сквозного электронного тока (I_e), зависимость которого показана на рисунке 10б.

Такая функция, как правило, монотонно спадает и выходит на насыщение при $U_p > 200 \text{ В}$. Аналогичная тенденция наблюдалась и в исследуемом варианте конструкции прототипа ПлаС-40, в котором насыщение приблизительно происходило при $U_p \approx 250 \text{ В}$. При насыщении соотношение \dot{m}_a / I_p 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. Так, при $U_p > 250 \text{ В}$ обычно происходит полная и однократная ионизация анодного расхода, поэтому по величине ионного тока может быть рассчитан анодный расход ксенона. По таким оценкам измеренному ионному току должен соответствовать анодный расход 1,60...1,65 мг/с, что на 10% меньше фактически подаваемого. По результатам испытаний также был определен коэффициент ионизации рабочего тела, который оказался $K_i < 1$, что, в

первую очередь, с высокой вероятностью свидетельствует о неполной ионизации используемого рабочего тела.

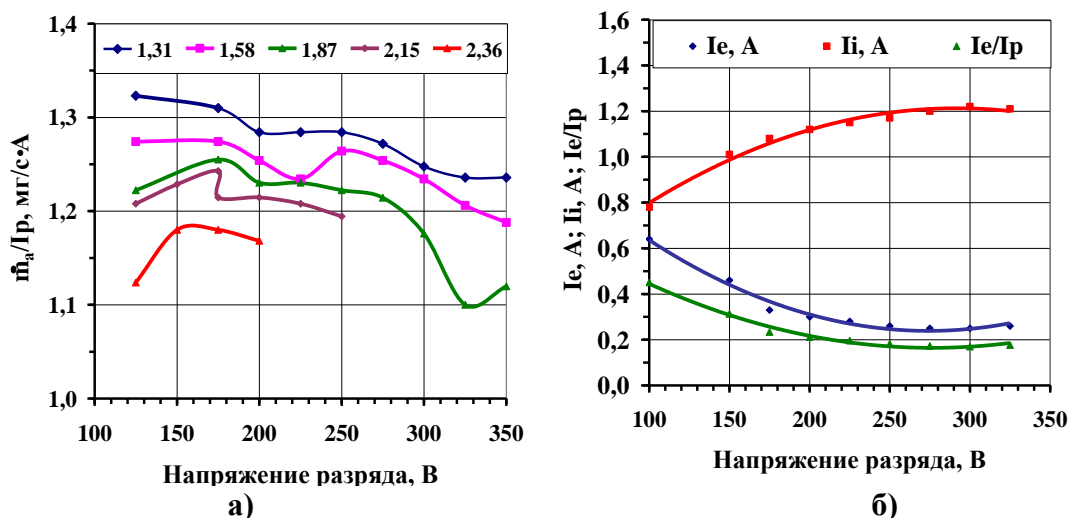


Рис.10. Интегральные характеристики прототипа двигателя ПлаС-40 в исходном состоянии - без промежуточных колец (с зоной ионизации меньше предельной) при различных токах разряда: а) зависимость отношения \dot{m}_a / I_p и б) зависимость ионного тока, сквозного электронного тока и его доли (при $\dot{m}_a = 1,8$ мг/с) от изменения разрядного напряжения

На рисунке 11а представлена конфигурация магнитного поля для варианта РК с немагнитными промежуточными кольцами толщиной 3 мм, выбранной по результатам испытаний, при которых среднее значение коэффициента ионизации рабочего тела составляло $K_i \approx 1$. В результате следующих изменений конструкции продольные магнитные зазоры были изменены: $\delta_{a+вп} = 3,5$ мм и $\delta_{a+нп} = 4,5$ мм.

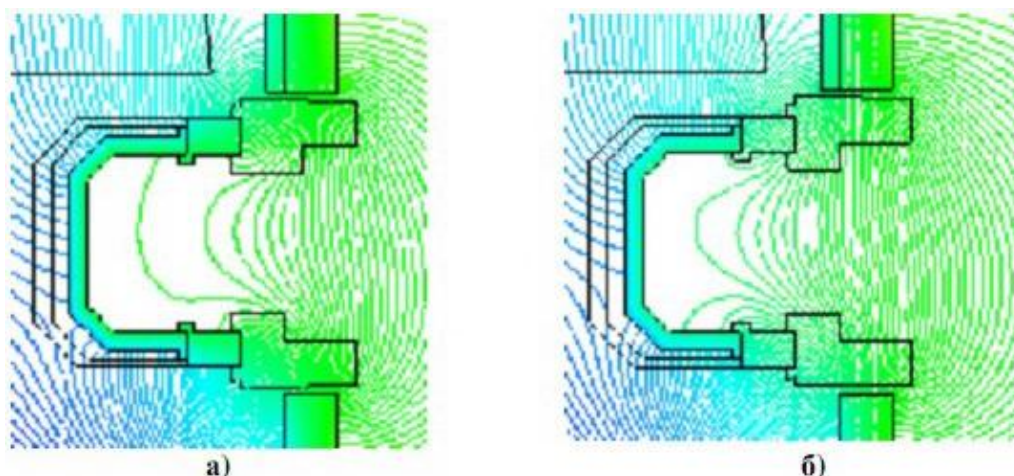


Рис.11. Конфигурация магнитного поля магнитной системы с полым магнитным анодом с: а) магнитными вставками (сталь 10880) и б) немагнитными вставками (сталь 12X18N10T) высотой 3 мм, расположенными между анодом и керамическими кольцами

В результате таких изменений конфигурации объем анодной полости подачи рабочего тела в РК увеличился на 34,1% и стал равен $V_{PK+3} = 11,1$ см³, при этом площадь

токосъемной внутренней поверхности анода увеличилась на 22,8% и составила $S_{a+3}=33,1 \text{ см}^2$. Кроме того, увеличилась глубина анодной полости до 9 мм. При этом и радиальные каналы впрыска рабочего тела, размещенные только с внешней стороны полого анода и задающие чередованием различные направления впрыска РТ как строго по радиусу модели, так и в обратном направлении от среза РК в глубь анодной полости (противоходом относительно направления ускорения плазмы), переместились соответственно на 3 мм в глубь РК.

В другом варианте конструкции были установлены магнитопроводящие промежуточные кольца с аналогичными геометрическими размерами, как и предшествующие немагнитные кольца. В результате выполненных преобразований геометрические параметры РК не изменились относительно предыдущего варианта конструкции. Изменения затронули лишь продольные магнитные зазоры, которые изменились и стали соответствовать значениям исходной конфигурации, а именно: между внутренним анодным торцом и обращенной к нему близлежащей плоскостью внутреннего магнитного полюса $\delta_{a+вп}=0,5 \text{ мм}$, а между наружным анодным торцом и обращенной к нему близлежащей плоскостью наружного магнитного полюса $\delta_{a+нп}=1,5 \text{ мм}$.

Изменившаяся при этом конфигурация магнитного поля за счет изменения продольных магнитных зазоров между анодом и соответствующими магнитными полюсами представлена на рисунке 11б.

Указанные варианты конструкции РК поочередно были испытаны в составе одной модели прототипа двигателя ПлаС-40.

Результаты исследовательских параметрических испытаний модели с увеличенным рабочим объемом зон ионизации и ускорения, достигнутый за счет использования магнитопроводящих промежуточных колец, представлены на рисунке 12.

Сопоставление полученных данных с данными испытаний в исходном состоянии показывают, что изменения конструкции РК, например, расширили область рабочих режимов до мощности 500 Вт и повысили интегральные характеристики модели в целом. По результатам испытаний видно, что при увеличении объема РК и одновременном смещении в глубь РК каналов впрыска рабочего тела, то есть удалении мест впрыска от начала зоны ионизации, удалось несколько снизить величину анодного расхода. Однако выявленная тенденция увеличения отношения \dot{m}_a / I_p при снижении анодного расхода (см. рис.12б) вероятней всего обусловлена также неполной ионизацией ксенона. Для окончательного выбора необходимых минимальных геометрических размеров и оптимизации РК при обеспечении полной ионизации рабочего тела (при предельном сокращении доли вторичной

ионизации и минимизации рекомбинаций) были выполнены дополнительные шаги по совершенствованию конструкции в выбранных направлениях по уточнению геометрических размеров РК, что и было выполнено в конструкции двигателя ПлаС-40.

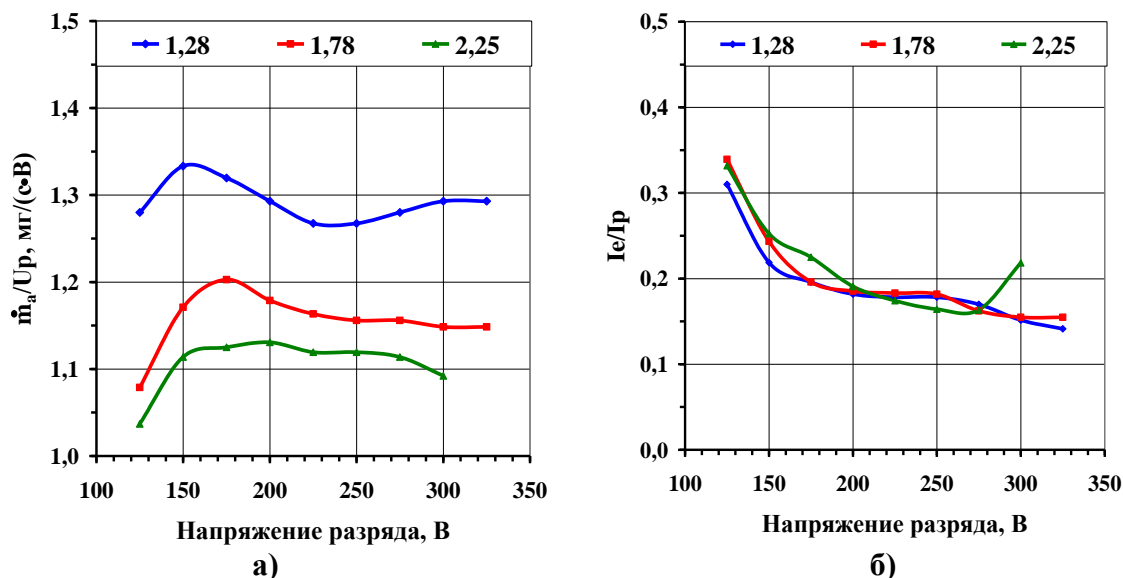


Рис.12. Контрольные интегральные характеристики прототипа двигателя ПлаС-40 при увеличенном объеме РК с применением магнитных промежуточных колец: а) зависимость отношения \dot{i}_a/I_p и б) доля ионного тока (при различных анодных расходах, мг/с) при изменении разрядного напряжения

Изменения структуры магнитного поля для двух вариантов конструкций прототипа ПлаС-40 для удобства проведения сравнительного анализа сведены на рисунке 13.

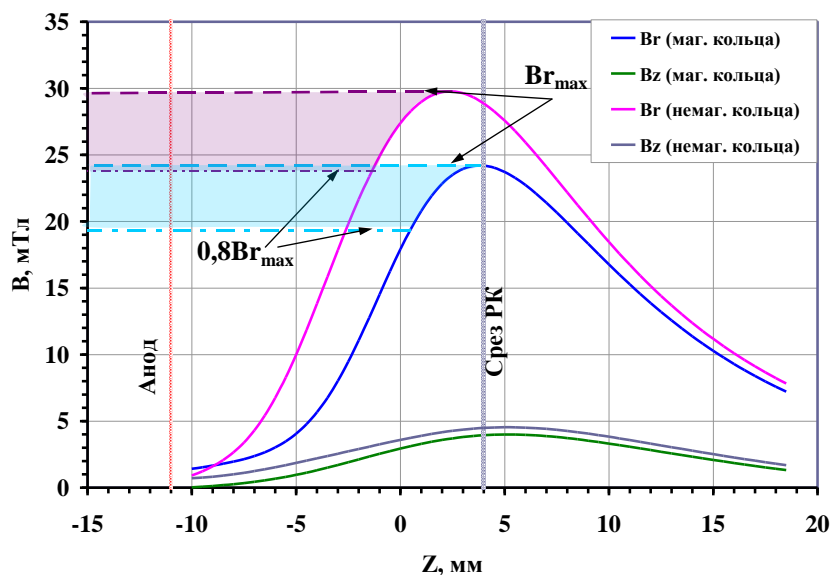


Рис.13. Зависимости магнитной индукции посередине УК прототипа ПлаС-40 с наружным и внутренним промежуточными кольцами из различных материалов

Как видно из рисунка 13, в прототипе двигателя ПлаС-40 с магнитными промежуточными кольцами общий уровень магнитного поля несколько ниже по сравнению с вариантом конструкции с немагнитными промежуточными кольцами, что свидетельствует

об оттоке части магнитного потока, проходящего в межполюсном промежутке, вследствие уменьшения магнитных сопротивлений зазоров между торцами магнитного анода и соответствующих магнитных полюсов.

Тем не менее, при этом обеспечивается достаточно большое значение продольного компонента градиента радиальной составляющей индукции магнитного поля $\nabla_z B_r = 16,24 \cdot 10^{-4}$ Тл/мм при скорости нарастания радиальной составляющей магнитной индукции в области максимальных магнитных полей $v_{B_r} = 31,92 \cdot 10^{-4}$ Тл/мм.

Расчеты магнитных полей выполнялись путем двухмерного моделирования магнитной системы прототипа ПлаС-40 при помощи программы NISA/EMAG. Результаты расчетов основных параметров и характеристик действующих магнитных полей при испытаниях для обоих вариантов промежуточных колец представлены на рисунке 14.

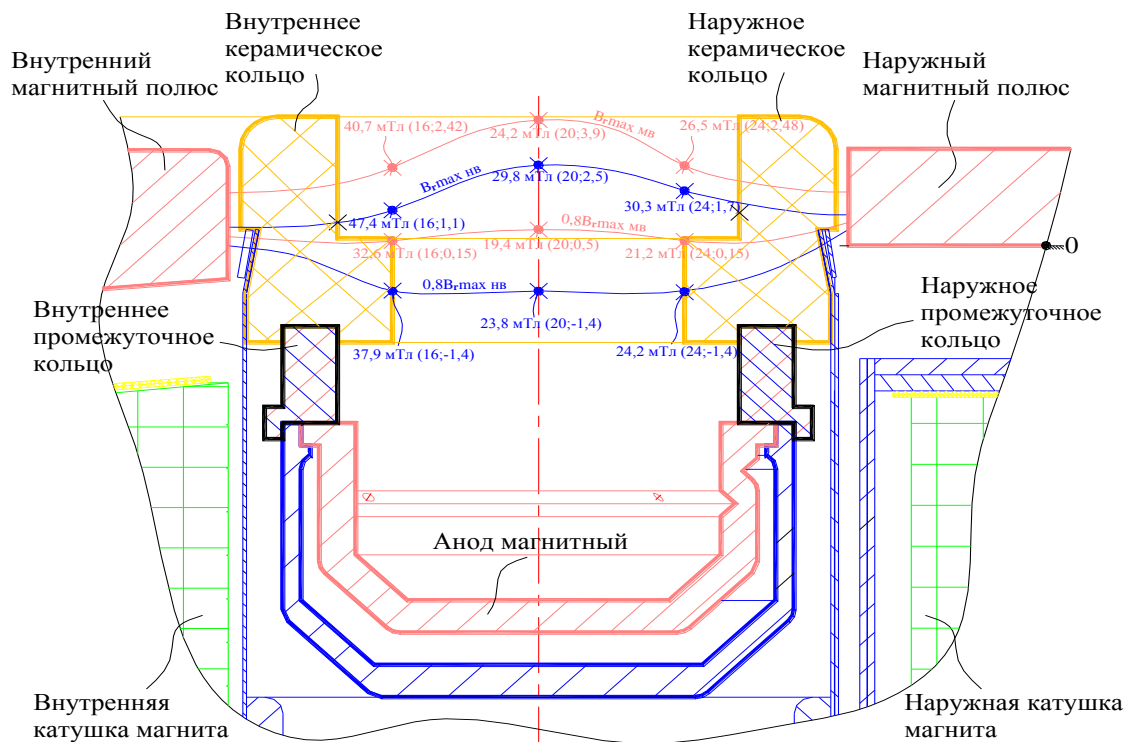


Рис.14. Расположение границ магнитной линзы с магнитными и немагнитными промежуточными кольцами в УК прототипа двигателя ПлаС-40

Как видно, относительно среза РК наблюдается смещение максимума радиальной составляющей индукции магнитного поля с перемещением вглубь УК при увеличенных продольных магнитных зазорах, которые реализуются в конструкции при применении немагнитных промежуточных колец.

Такая трансформация свидетельствует о перемещении области больших значений магнитного поля и, соответственно, смещения зон ионизации и ускорения. А, как известно, наиболее предпочтительным является вариант конструкции с так называемым вынесенным

магнитным полем к срезу РК (в предельном случае даже за пределы среза, однако данное предположение требует исследований для его подтверждения), что в конечном итоге позволило бы значительно уменьшить пояски эрозии стенок РК.

По результатам стендовых испытаний обоих вариантов конструкции зафиксированы прямо противоположные тенденции поведения колебаний тока разряда, полученные на различных режимах по разрядному току.

На рис. 15 представлены трендовые зависимости среднеквадратичных амплитуд разрядного тока от напряжения разряда для варианта конструкции полого магнитного анода с немагнитными промежуточными кольцами в РК. Как видно из графиков, при различных значениях тока разряда при увеличении напряжения разряда колебания разрядного тока возрастают.

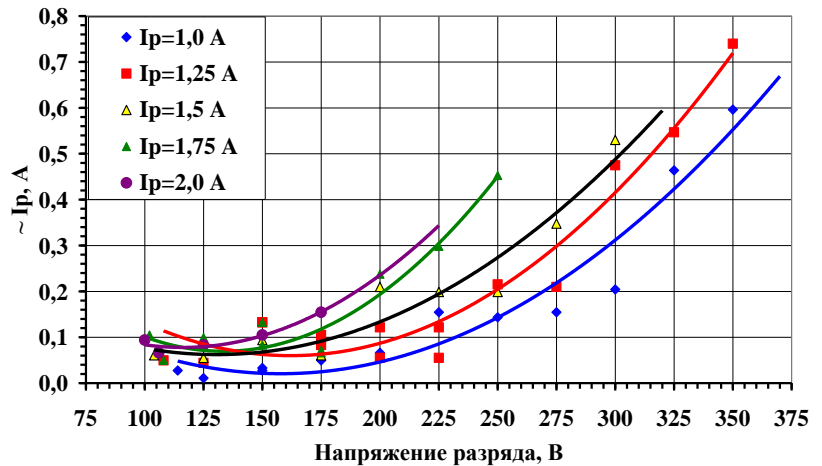


Рис.15. Зависимость среднеквадратичных амплитуд I_p полого магнитного анода с немагнитными промежуточными кольцами от напряжения разряда

Обратная тенденция зафиксирована при испытаниях варианта конструкции ГПД с полым магнитным анодом, в котором использовались дополнительные промежуточные магнитные кольца в РК. Полученные данные показаны на рисунке 16.

Из результатов испытаний видно, что на разных режимах по току разряда при увеличении разрядного напряжения колебания разрядного тока уменьшаются, что является более предпочтительным для достижения более стабильной работы двигателей, в особенности для перспективных высокоимпульсных двигателей, работающих при высоких разрядных напряжениях.

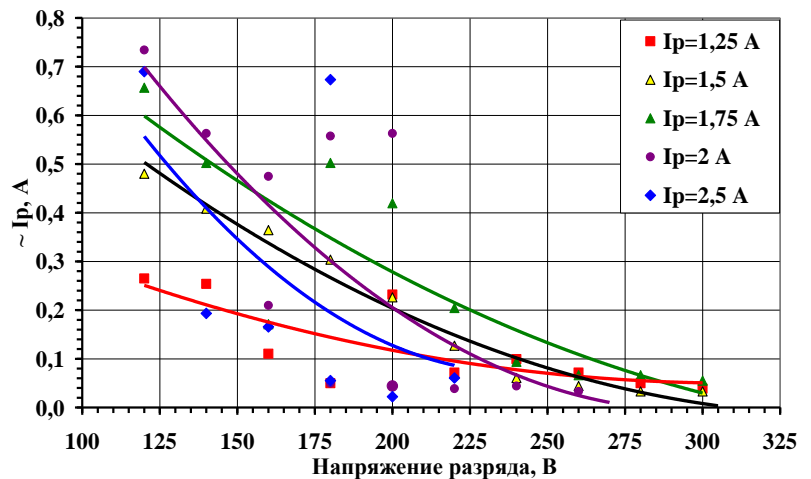


Рис.16. Зависимость среднеквадратичных амплитуд I_p полого магнитного анода с магнитными промежуточными кольцами от напряжения разряда

Заключение

По результатам проведенных исследований гибридных плазменных двигателей SPT-1 и прототипа ПлаС-40 определена степень влияния на их интегральные параметры ряда факторов, определяющих конфигурацию РК. В ходе работ исследовались общая протяженность УК, его ширина и форма, в частности в зоне ионизации и ускорения плазмы, соотношение линейных размеров комбинированной «металл-керамической» РК и расположение магнитной линзы относительно элементов конструкции магнитной системы и стенок УК. Полученные данные на обеих моделях ГПД показывают, что на их интегральные параметры и характеристики существенное влияние оказывают протяженность, ширина и форма УК. При этом степень влияния которых возрастает с увеличением рабочей мощности. Варьируя протяженностью УК можно достигнуть достаточно высоких значений удельного импульса ~ 3200 с (при мощности 2,3 кВт) при уменьшении энергетических затрат на 25-30%. Уширение УК (в 1,2-1,4 раза) на выходе позволяет обеспечить сочетание достижения высоких значений тяги в режиме работы с высоким удельным импульсом. Оптимизация расположения магнитной линзы таким образом, чтобы ее «нижняя» граница ($\sim 0,8V_{rmax}$) пересекала поперечные переходные участки диэлектрических стенок РК в местах уширения зоны ионизации, позволяет повысить стабильность основных выходных параметров за счет снижения колебаний разрядного тока (в 2,5-3 раза), что особенно важно при стремлении к работе ЭРД при повышенных разрядных напряжениях. В результате исследовательских работ на двигателях различного типоразмера (с серединным диаметром УК $\varnothing 40$ и $\varnothing 85$ мм) и мощности в диапазоне от 100 Вт до 3 кВт сформулированы типовые характеристические соотношения геометрических размеров, определяющих конфигурацию параметрического ряда гибридных плазменных двигателей.

Сведения об авторах

Владимир Васильевич Гопанчук – ведущий конструктор ФГУП ОКБ «Факел», г. Калининград, 8 (4012) 55-66-62;

Мира Юрьевна Потапенко – аспирант РГУ им. И.Канта, инженер ФГУП ОКБ «Факел», г. Калининград, mira-world@yandex.ru, 8 (4012) 55-66-20.

Библиографический список

1 А.У. Ишлинский (гл. ред.) и др. Политехнический словарь // 3 изд., переработанное и дополненное. М.: Советская энциклопедия, 1989 г., стр.117.

2 D. Manzella, D. Jacobson, R. Jankovsky. High voltage SPT performance- paper AIAA- 2001- 3774, 37th Joint Propulsion Conference, July 8-11, 2001, Salt Lake City, Utah.

3 V.Kim, K.N.Kozubsky, V.M.Murashko, A.V.Semenkin. History of the Hall Thrusters Development in USSR // IEPC-2007-142, 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy , September 17-20, 2007.

4 О.А. Горшков, В.А.Муравлёв, А.А. Шагайда. Холловские и ионные двигатели для космических аппаратов // под ред. Академика РАН А.С. Коротева. М.: Машиностроение, 2008.

5 Н.В. Белан, В.П. Ким, А.И. Оранский, В.Б. Тихонов. Стационарные плазменные двигатели // Харьков: Харьк.авиацион-т, 1989.

6 V.Kim,V.I. Kozlov, A.I. Skrylnikov, E.K. Sidorenko. Investigation of the SPT operation and discharge chamber wall erosion rate under increased discharge voltages // IEPC-2007-151, 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007.

7 V.Kim,V.I. Kozlov, A.I. Skrylnikov, E.K. Sidorenko, L.Umnistin. Highvoltage SPT studies // Spacecraft Propulsion Conference, 2008, paper 42-127.

8 А.И. Морозов. Физические основы космических электрореактивных двигателей. Элементы динамики потоков ЭРД // М.: Атомиздат, 1978.

9 О.А. Горшков, В.А.Муравлёв, А.А. Шагайда. Холловские и ионные двигатели для космических аппаратов // под ред. Академика РАН А.С. Коротева. М.: Машиностроение, 2008.

10 Б.А. Архипов, А.М. Бишаев, В. Гаврюшин, Ю.М. Горбачев, В. Ким, В.И. Козлов, К.Н. Козубский, Н.А. Масленников, А.И. Морозов, Д.Д. Севрук. Плазменный ускоритель с замкнутым дрейфом электронов // Патент РФ №2030134, кл. 4 H05H1/54, F 03H 1/00, 04.11.1991.

11 В.В. Гопанчук. Плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов // Патент RU №2191487, кл. H05H1/54, F03H 1/00, 30.10.2000.

12 В.В. Гопанчук, И.Б. Сорокин. Плазменный ускоритель с замкнутым дрейфом электронов // Патент RU№2209533, кл. H05H1/54, F03H 1/00, 10.10.2001.