

УДК 533.9.07

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗРАБОТКИ
КОНКУРЕНТОСПОСОБНОГО СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО
ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ,
РАБОТАЮЩЕГО НА КСЕНОНЕ И КРИПТОНЕ**

© 2019 г. Д. П. Грдличко^{1, *}, В. С. Захарченко¹, В. Г. Калязин¹, В. П. Ким¹,
М. В. Коркунов², В. А. Лесневский², Д. В. Меркурьев¹, Г. А. Парахин²,
Г. А. Попов¹, Е. А. Шилов¹

¹Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики Московского
авиационного института (национального исследовательского университета), Москва, Россия

²Опытное конструкторское бюро “Факел”, Калининград, Россия

*e-mail: riame4@sokol.ru

Поступила в редакцию 03.04.2019 г.

После доработки 19.04.2019 г.

Принята к публикации 29.04.2019 г.

В статье представлены результаты разработки конкурентоспособного стационарного плазменного двигателя (СПД) малой мощности. В частности, показано, что из-за необходимости уменьшения размеров двигателя, снижаются его характеристики, усложняется решение проблемы обеспечения большого ресурса двигателя. Показано также, что известно несколько подходов к решению данной проблемы. В исследовании используется подход, который был использован при разработке двигателей СПД-100 и СПД-140. Согласно этому подходу слой ионизации и ускорения смещается в выходном направлении из двигателя увеличением градиента магнитной индукции и смещением максимума ее распределения вдоль срединной поверхности канала за пределы плоскости полюсов магнитной системы. Дополнительно используется расширение выходной части ускорительного канала также за пределами названных полюсов для снижения влияния взаимодействия плазма–стенка на толщину СИУ. Ожидалось, что совокупность этих мер позволит полностью разместить СИУ и зоны эрозии стенок в названной расширенной части канала за пределами минимальной поверхности, охватывающей элементы магнитной системы. Это даст возможность увеличить запасы на износ стенок в выходной их части для увеличения ресурса двигателя. Исследование характеристик и эрозионные испытания модели СПД-40М, в которой реализован названный подход, позволили показать, что действительно удастся разместить СИУ и зоны эрозии стенок полностью в расширенной выходной части ускорительного канала и за пределами названной минимальной поверхности и получить удовлетворительные тяговую эффективность и удельный импульс тяги при работе названной модели на режимах с мощностью разряда 200 Вт на ксеноне и 250 Вт на криптоне. Полученные скорости износа стенок и увеличенные толщина стенок в модели СПД-40М подтверждают возможность создания на ее основе СПД малой мощности с большим ресурсом.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, разработка, рабочее вещество, ксенон, криптон, характеристики, эрозия стенок, ресурс

DOI: 10.1134/S0002331019030087

ВВЕДЕНИЕ

Одной из тенденций в современной космической технике является все большее расширение применения электроракетных двигателей (ЭРД) для управления движе-

нием космического аппарата (КА). В частности, стационарные плазменные двигатели (СПД), использующие ксенон в качестве рабочего тела, успешно отработали или работают в настоящее время в системах коррекции нескольких десятков КА для обеспечения связи и передачи информации, дистанционного зондирования Земли [1, 2]. Применение СПД началось и для довыведения КА на геостационарную орбиту, а также для транспортировки исследовательских КА с околоземной на окололунную орбиту [2, 3]. Планируется также их использование для расстановки и поддержания положения КА на нужных орбитах в составе многоспутниковых группировок. В связи с этим повысился интерес к разработке СПД малой мощности. Кроме того, с учетом большой стоимости ксенона, малой его распространенности в природе и небольших объемов производства все больший интерес проявляется и к более дешевым, альтернативным ксенону рабочим веществам (РВ). Среди них естественный интерес представляет криптон, по следующим причинам:

- криптон является таким же инертным газом, как и ксенон, что упрощает решение задач его хранения и подачи в двигатель, минимизирует воздействие струи работающего двигателя на элементы конструкции КА;
- он больше чем на порядок дешевле ксенона и производится в неизмеримо больших объемах.
- он имеет 1-ый потенциал ионизации, близкий к соответствующему потенциалу ионизации ксенона, что в принципе обеспечивает возможность создания достаточно эффективных СПД и на криптоне.

Применительно к СПД средней мощности к настоящему времени показана возможность создания двигателя с тяговой эффективностью, практически не уступающей двигателю на ксеноне [4–6]. Для двигателей же малой мощности создать достаточно эффективный СПД малой мощности сложно не только на криптоне, но и на ксеноне в силу действия целого ряда факторов [7], которые подробнее будут рассмотрены позже. Эти факторы определяют принципиальные сложности обеспечения высокой тяговой эффективности и большого ресурса СПД малой мощности. Кроме того, с уменьшением размеров двигателя все больше осложняется проблема обеспечения большого его ресурса. Поэтому задачей данной работы являлось определение возможности создания конкурентоспособного СПД малой мощности при его работе на криптоне. Полученные в результате этого исследования результаты представлены в данной статье.

1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ СОЗДАНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНЫХ СПД МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Как уже отмечалось во введении, выполненные к настоящему времени исследования свидетельствуют о возможности разработки достаточно эффективных СПД средней и большой мощности, работающих на криптоне. Так, лабораторная модель масштаба современного двигателя СПД-140 разработки ОКБ “Факел” при соответствующей ее модернизации может работать длительное время на режиме с мощностью до 10 кВт, тягой до 500 мН, тяговым коэффициентом полезного действия не менее 60% и удельным импульсом тяги до 2600–2700 с [6]. При этом имеются предпосылки и для получения большого ресурса двигателя такого масштаба. Для СПД малой мощности решение названной проблемы существенно усложняется по следующим причинам:

А. Для создания СПД малой мощности необходимо уменьшать размеры двигателя из-за того, что для уменьшения мощности необходимо уменьшать расход РВ через двигатель. Это приводит к необходимости уменьшения размеров ускорительного канала для сохранения в нем концентрации плазмы и длины свободного пробега $\lambda_i = V_a / \langle \sigma_i V_i \rangle n_e$ атомов до их ионизации на уровне, обеспечивающем приемлемые значения коэффициента переработки потока атомов в ионы (коэффициента использования РВ). Длина свободного пробега атомов зависит от скорости атомов V_a , коэффициента

скорости ионизации $\langle \sigma_i V_e \rangle$, усредненного по функции распределения электронов по скоростям, и концентрация n_e электронов в слое ионизации и ускорения (СИУ), которую можно изменять, изменяя расход $\dot{m}$ РВ через ускорительный канал. В конечном счете это приводит к тому, что для получения высокой тяговой эффективности плотность массового расхода РВ в ускорительном канале СПД должна удовлетворять следующему соотношению [4]:

$$\frac{\dot{m}}{S_{ch}} \geq \frac{V_i V_a}{\langle \sigma_i V_e \rangle L} \approx C_1 \frac{\sqrt{k T_a e \Delta U}}{\langle \sigma_i V_e \rangle L}, \quad (1)$$

где S_{ch} , $\bar{V}_i$, e , $k T_a$, ΔU , L , C_1 — соответственно, площадь поперечного сечения ускорительного канала, продольная составляющая скорости ионов в СИУ, заряд электрона, температура атомов, падение потенциала в СИУ, продольный размер (толщина) СИУ, в котором реализуется основное падение потенциала в разряде, и постоянный коэффициент, не зависящий от рода РВ.

Результаты последних исследований свидетельствуют также о том, что, несмотря на различие свойств ксенона и криптона, минимальные значения плотности расхода как ксенона, так и криптона составляют примерно одну и ту же величину порядка 0.1 мг/с см² [6], если ее рассчитывать с учетом начального расширения канала или его расширения в результате длительной работы двигателя. Это приводит к тому, что при сопоставимых условиях по переработке потока атомов в ионы, разрядный ток при работе на криптоне должен быть в примерно в M_{Xe}/M_{Kr} раз больше, где M_{Xe} и M_{Kr} — атомные массы ксенона и криптона. Поэтому на сопоставимых режимах при работе двигателя на криптоне мощности разряда будут всегда больше, чем при работе на криптоне. Это дополнительно усложняет решение проблемы обеспечения большого ресурса двигателей на криптоне.

В данной работе предполагалось, что разрабатываемый СПД малой мощности должен работать при мощностях не более 200 Вт на ксеноне и не более 250 Вт на криптоне. При типичных разрядных напряжениях для СПД небольшой мощности 180–250 В разрядный ток в двигателе при названной мощности не должен превышать 1.0–1.4 А. Если принять, что разрядный ток СПД будет превышать соответствующий ток при работе на ксеноне примерно в 1.6 раз и учесть, что в СПД при его работе на ксеноне разрядный ток в амперах численно примерно равен расходу ксенона в мг/с, то ожидаемые расходы криптона через ускорительный канал могут составлять 0.6–0.9 мг/с. Кроме того, при работе СПД на криптоне с малыми мощностями отношение разрядного тока к расходу заметно меньше, чем при работе на криптоне, из-за меньших коэффициентах переработки потока атомов в ионы [8]. Поэтому значения расхода криптона будут скорее всего около 1 мг/с или больше. Предыдущие работы показали также, что такие расходы и режимы работы могут быть реализованы в двигателе традиционной схемы при диаметрах наружного канала около 40 мм и было подтверждено, что основной проблемой разработки такого двигателя является обеспечение большого его ресурса [9].

Б. При уменьшении размеров ускорительного канала уменьшается и диаметр центрального сердечника и других элементов магнитной системы в двигателе традиционной схемы, и это, начиная с определенного размера двигателя, затрудняет оптимизацию магнитного поля [7]. Так, при пропорциональном изменении ширины канала и его среднего диаметра с уменьшением характерного размера двигателя (диаметра или ширины ускорительного канала b_{ch}) оптимальное значение магнитной индукции в канале должно возрастать в первом приближении пропорционально $1/b_{ch}$, а сечение сердечника центральной катушки намагничивания будет убывать пропорционально b_{ch}^2 [7]. Поэтому при малых размерах двигателя оказывается невозможным создавать оптималь-

ное магнитное поле, аналогичное полям в больших двигателях, из-за насыщения, как минимум, центрального сердечника, и приходится использовать иные решения.

В. С уменьшением размеров двигателя возникает также проблема обеспечения необходимого для длительной работы запаса толщины стенок разрядной камеры на их износ. Если принять, что соотношение размеров элементов конструкции СПД малой мощности будет примерно таким же, как и в двигателе большого размера, то уменьшение размеров двигателя традиционной схемы будет приводить к уменьшению толщины стенок и соответствующих запасов на их износ. Таким образом, ресурс такого СПД должен уменьшаться с уменьшением размеров двигателя примерно пропорционально характерному его размеру. В то же время требования к ресурсу СПД малой мощности оказываются близкими к требованиям по ресурсу для двигателей средней мощности. Поэтому проблема обеспечения большого ресурса становится критической для решения задачи создания конкурентоспособных СПД малой мощности как на ксеноне, так и на криптоне. И для ее решения необходима разработка новых решений по организации рабочих процессов в СПД малой мощности. С учетом изложенного основной задачей данной работы являлась разработка решений, которые могут обеспечить большой ресурс СПД малой мощности, работающего на криптоне при сохранении приемлемого уровня его тяговой эффективности. В случае успеха эти решения, естественно, будут использованы и в конструкции двигателя на ксеноне. Поэтому проверялась эффективность разработанных решений и при работе разрабатываемого двигателя на ксеноне.

Анализ результатов работ по повышению ресурса СПД свидетельствует о том, что в настоящее время они проводятся по нескольким направлениям. Первое из них развивает традиционное направление, позволяющее управлять слоем ионизации и ускорения изменением магнитного поля, а также размерами и конфигурацией ускорительного канала с целью максимального вынесения СИУ из конструкции двигателя [10, 11]. Достоинством этого направления является использование традиционных средств управления и определенная предсказуемость ожидаемых результатов.

Второе направление называется “магнитной защитой” стенок и также использует управление магнитным полем и конфигурацией ускорительного канала [12]. Но, как показали первые работы в этом направлении [13], при попытках его реализации применительно к малоразмерным СПД возникают трудности, которые сложно преодолеть.

Третье направление сводится к переходу к другим схемам двигателя. Среди них наиболее популярной является схема так называемого цилиндрического двигателя, впервые предложенного сотрудниками Принстонского университета (США) [14]. Но в этих схемах рабочие процессы отличаются очень значительно от того, как работает классический СПД. Кроме того, они не дают преимуществ по тяговым характеристикам по сравнению с двигателями традиционных схем.

С учетом изложенного в данной работе выбрано первое из названных выше направлений, при реализации которого решается задача максимально возможного вынесения СИУ из конструкции двигателя соответствующим вынесением максимума распределения магнитной индукции за плоскость полюсов магнитной системы. Поэтому была разработана и изготовлена модель СПД с наружным диаметром ускорительного канала около 40 мм и шириной канала в межполюсном зазоре 6 мм (далее модель СПД-40М, рис. 1), магнитная система которой позволила сместить максимум упомянутого распределения магнитной индукции на 3 мм за плоскость полюсов магнитной системы, т.е. более чем на 50% от ширины канала в межполюсном зазоре. Кроме того, было использовано предварительное расширение канала с учетом того, что при расширении выходной части канала в процессе ресурсных испытаний двигателя СПД-100 на углы порядка 30–45 градусов, скорость износа снижается до 4–5 раз, и дальнейшее расширение канала из-за износа стенок не приводит к значительному смещению зон эрозии стенок [15]. При этом скорость износа внутренней стенки выходит на уровень 3.5–4 мкм/ч, а наружной стенки – на уровень 2 мкм/ч. Это свидетельствует о су-

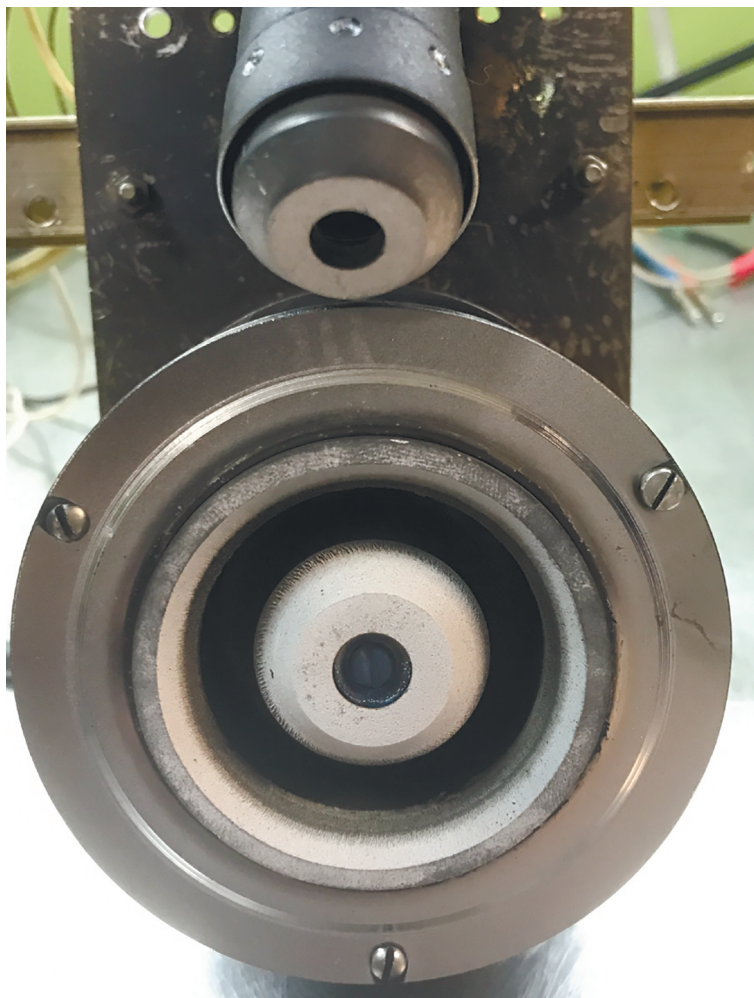


Рис. 1. Фото модели СПД-40М после испытаний.

ществленном уменьшении потоков ускоренных ионов и соответствующего энергосделения на стенках, а также о снижении влияния стенок на формирование СИУ и на его толщину. Более того, оно должно способствовать уменьшению продольного размера (толщины) СИУ, как минимум, за счет снижения пристеночной электронной проводимости поперек магнитного поля вследствие снижения концентрации плазмы у стенок и потоков взаимодействующих с ней электронов. Поэтому даже при названном вынесении максимума индукции магнитного поля появляется шанс полностью разместить СИУ в расширенной за пределами плоскости полюсов части канала. В расчете на это в модели СПД-40М увеличены запасы на износ выходных частей стенок разрядной камеры путем увеличения их толщины в радиальном направлении, в свободном от полюсов пространстве с целью увеличения ресурса модели.

Выходные кольца разрядной камеры были выполнены сменными и, начиная примерно от плоскости полюсов, они были выполнены с расширенной выходной частью канала, ограниченной коническими поверхностями стенок с углами расширения ка-

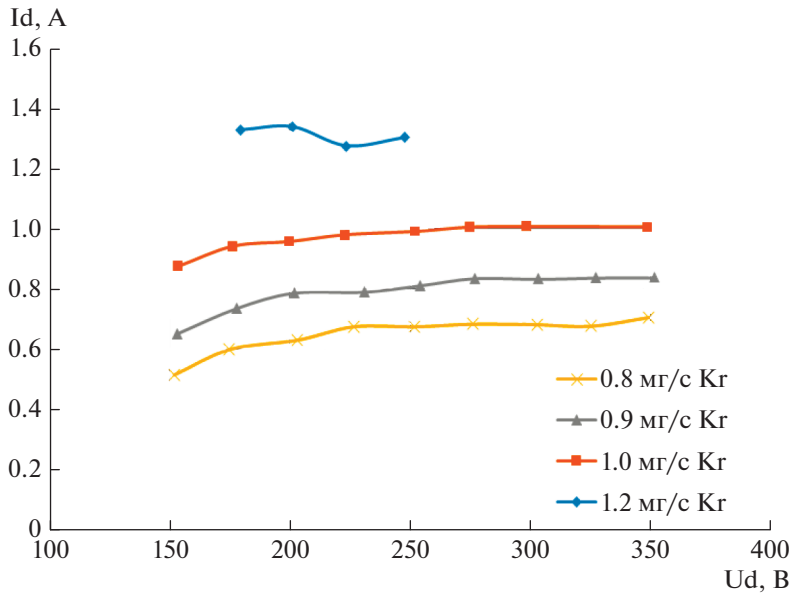


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики модели СПД-40М при работе на криптоне.

нала на 30 градусов на сторону. При этом определялись интегральные характеристики модели, и были проведены эрозионные испытания с целью определения положения зон эрозии и скоростей износа стенок. Полученные при этом результаты приведены в следующем разделе.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ СПД-40М И ЭРОЗИОННЫХ ЕЕ ИСПЫТАНИЙ

На первом этапе исследований, как обычно, определялись вольт-амперные и тяговые характеристики созданной модели при ее работе на ксеноне и криптоне. Для этого модель размещалась в вакуумной камере диаметром 2 м и рабочей длиной до 3.5 м, откачиваемой “сухими” форвакуумным и криогенными высоковакуумными насосами, обеспечивавшими давление в вакуумной камере при работе модели не выше 3×10^{-3} Па. В процессе исследований измерялись разрядное напряжение и разрядный ток, расходы рабочего газа через ускорительный канал (анод) и катод, а также измерялась реактивная тяга, развиваемая моделью. При всех исследованиях использовался катод разработки ОКБ “Факел”, способный обеспечивать разрядные токи 0.8–1.0 А при расходах ксенона или криптона 0.1–0.15 мг/с. Ниже все характеристики приведены при расчете выходных параметров двигателя с учетом суммарного расхода РВ через двигатель.

При работе на ксеноне были получены типичные для моделей малой мощности характеристики. Достаточно сказать, что при разрядном напряжении 250 В и мощности около 190 Вт было получено значение тяги 10.7 мН при расходе ксенона через двигатель 1.05 мг/с. При этом тяговый коэффициент полезного действия составлял 27%, а удельный импульс тяги — 1050 с.

Характеристики модели СПД-40М при ее работе на криптоне приведены на рисунках 2–6. Они также имеют типичный для СПД вид. При суммарном расходе криптона 1 мг/с, разрядном напряжении около 250 В и мощности около 250 Вт (рис. 3) тяга модели составила около 9.7 мН, тяговый КПД — 0.17, а удельный импульс тяги — около 900 с. Следует отметить, что характеристики СПД зависят от состояния поверхностей

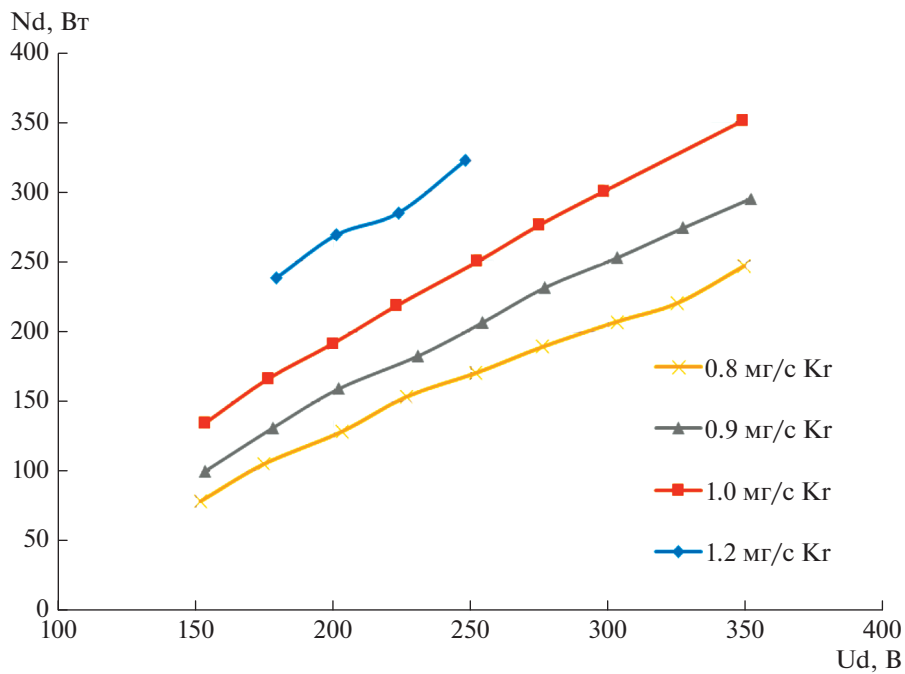


Рис. 3. Зависимости мощности разряда модели СПД-40М от режима работы.

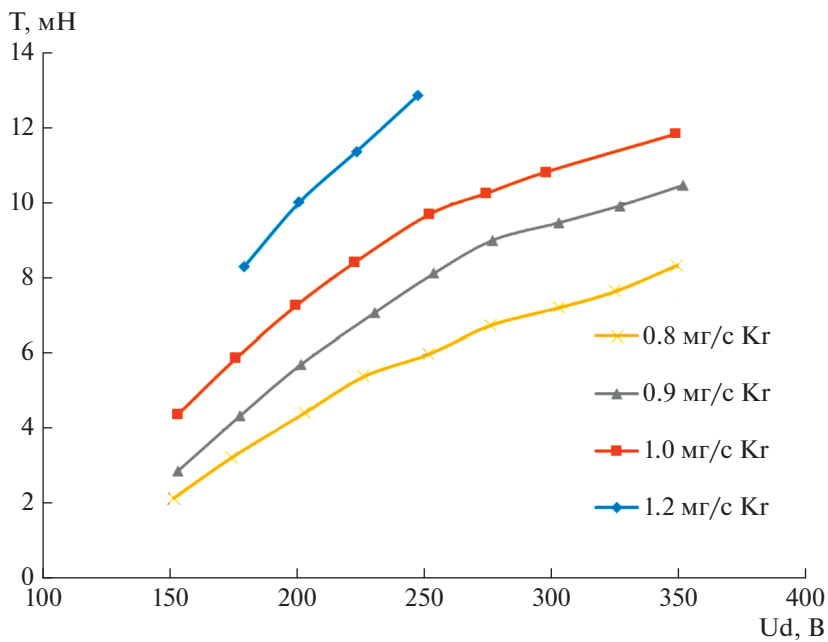


Рис. 4. Зависимости тяги модели СПД-40М от режима работы.

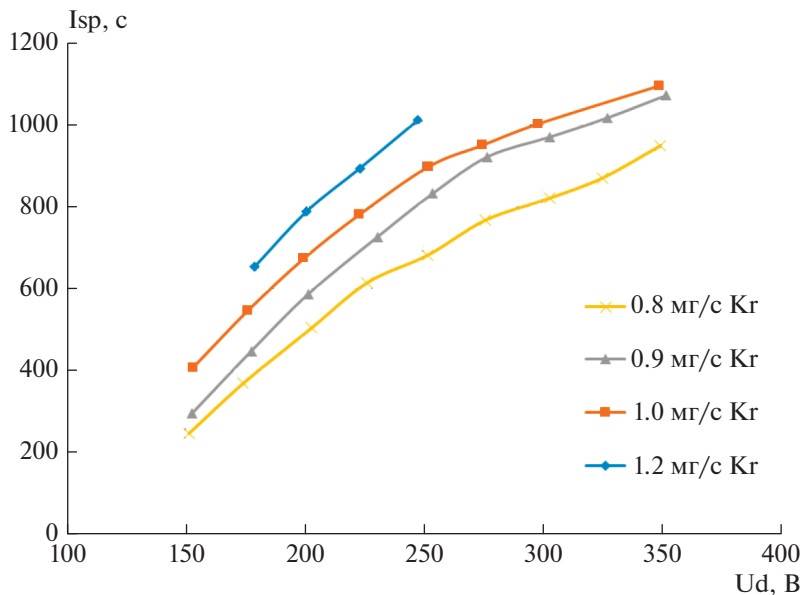


Рис. 5. Зависимости удельного импульса тяги модели СПД-40М от режима работы.

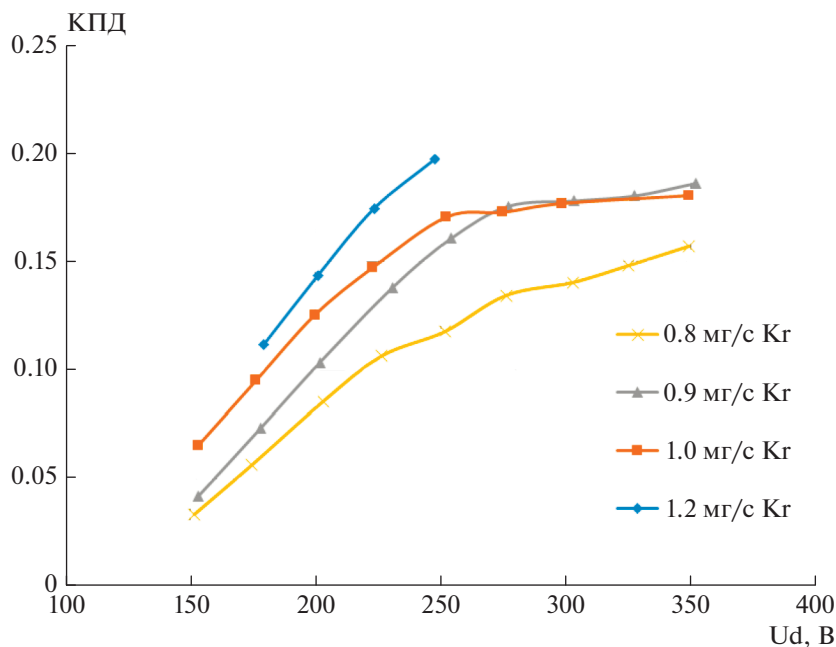


Рис. 6. Зависимости тягового КПД модели СПД-40М от режима работы.

элементов разрядной камеры, ограничивающих ускорительный канал. Поэтому параметры двигателя более надежно определяются при достаточно длительных испытаниях. И такие испытания на выбранных режимах работы были проведены при работе модели СПД-40М как на ксеноне, так и на криптоне.

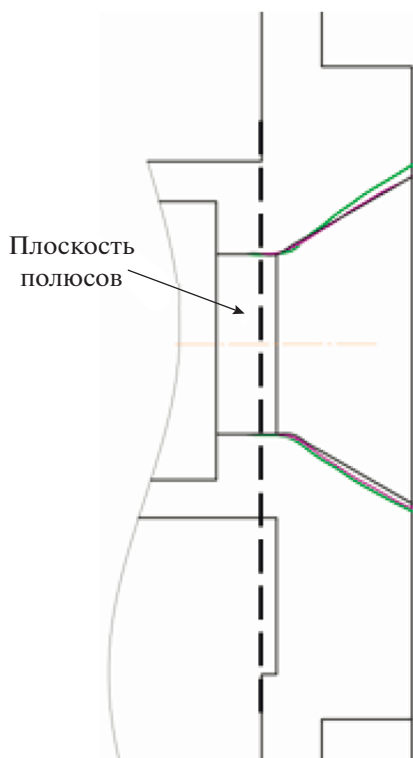


Рис. 7. Размещение зон эрозии в ускорительном канале модели СПД-40М после 50-часовой наработки на ксеноне.

Невысокий уровень тягового КПД при работе на обоих РВ и более низкий уровень тяговой эффективности модели при ее работе на криптоне объясняются более высоким первым потенциал ионизации криптона и малыми расходами криптона и ксенона на рассмотренных режимах работы вследствие необходимости ограничения мощностей разряда значениями 200 Вт для ксенона и 250 Вт для криптона [8].

С учетом полученных результатов были выбраны предварительные номинальные режимы работы модели СПД-40М, и проведены 50-часовые эрозионные испытания модели при ее работе на ксеноне и 150-часовые эрозионные испытания – при ее работе на криптоне на приведенных режимах. После приработки в течении первых 20 ч при работе на ксеноне и в течении 40 ч при работе на криптоне эти режимы уточнялись и средние значения параметров при остальных наработках приведены в табл. 1.

Проведенные испытания показали следующее:

– и при работе на ксеноне и при работе на криптоне зоны эрозии стенок разрядной камеры разместились в расширенной части ускорительного канала (рис. 7), что опре-

Таблица 1. Выбранные номинальные режимы работы СПД-40М

Рабочее вещество	Расход через анод, мг/с	Расход через катод, мг/с	Разрядное напряжение, В	Номинальная мощность разряда, Вт
Ксенон	0.95	0.1	225	200
Криптон	0.95	0.1	255	250

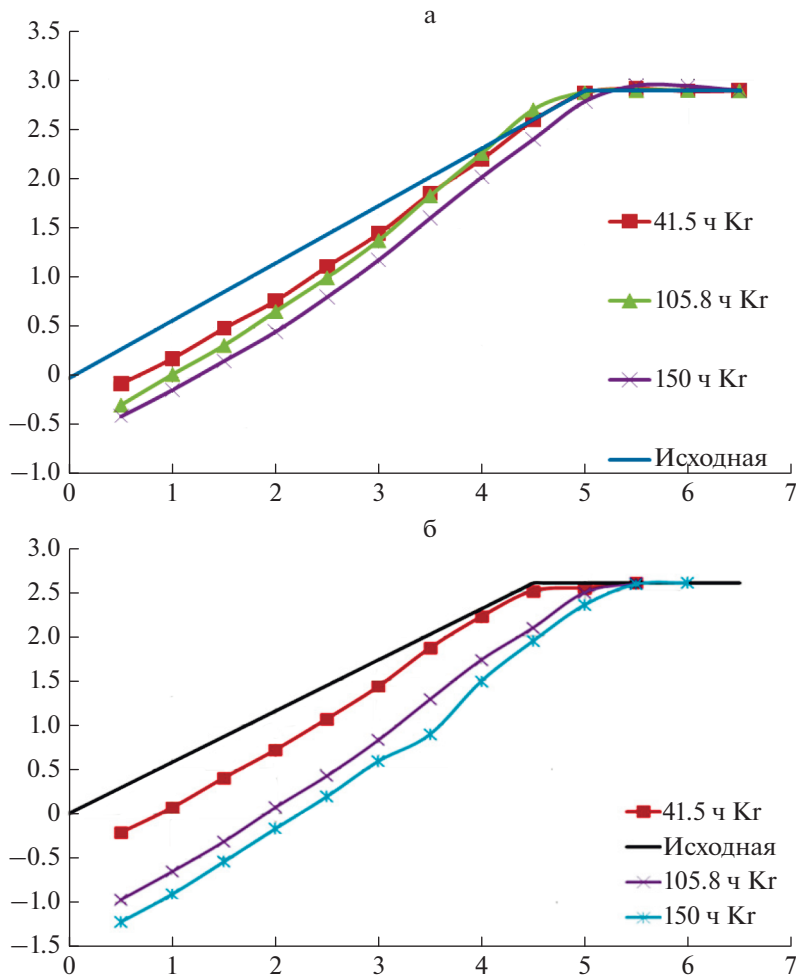


Рис. 8. Профили стенок наружного (а) и внутреннего (б) выходного кольца разрядной камеры модели СПД-40М после разных наработок на криптоне.

деляет возможность увеличения толщины стенок в радиальном направлении для увеличения запасов на износ и увеличения ресурса двигателя при соответствующем выполнении его конструкции;

- максимальные скорости износа, определенные на базе 50 ч при работе на ксеноне, не превысили 6 мкм/ч;

- при работе на криптоне за первые 100 ч максимальные скорости износа не превысили 9 мкм/ч, а при последующей наработке от 105.8 ч до 150 ч, они снизились примерно до 6.8 мкм/ч (рис. 8–9);

- выходные параметры модели оставались достаточно стабильными (рис. 9–10), при этом средние значения разрядного тока при работе на криптоне составляли 0.95 ± 0.05 А, разрядного напряжения – 255 В и мощности разряда на установившемся режиме – (242 ± 10) Вт, тяги – 10 ± 0.3 мН, полного тягового КПД 0.17–0.20, удельного импульса тяги – 950 ± 50 с;

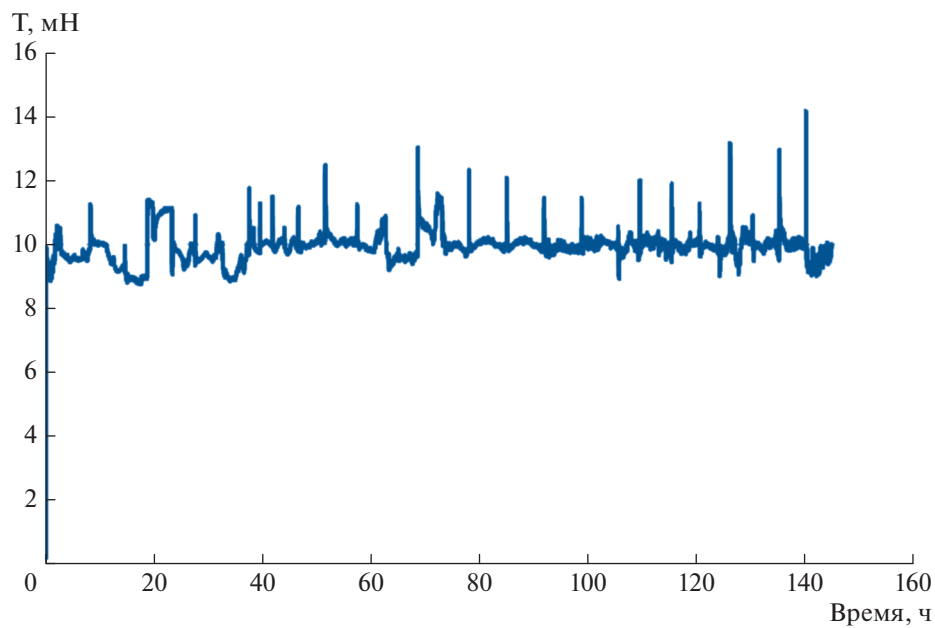


Рис. 9. Изменение тяги СПД-40М в процессе наработки на криптоне.

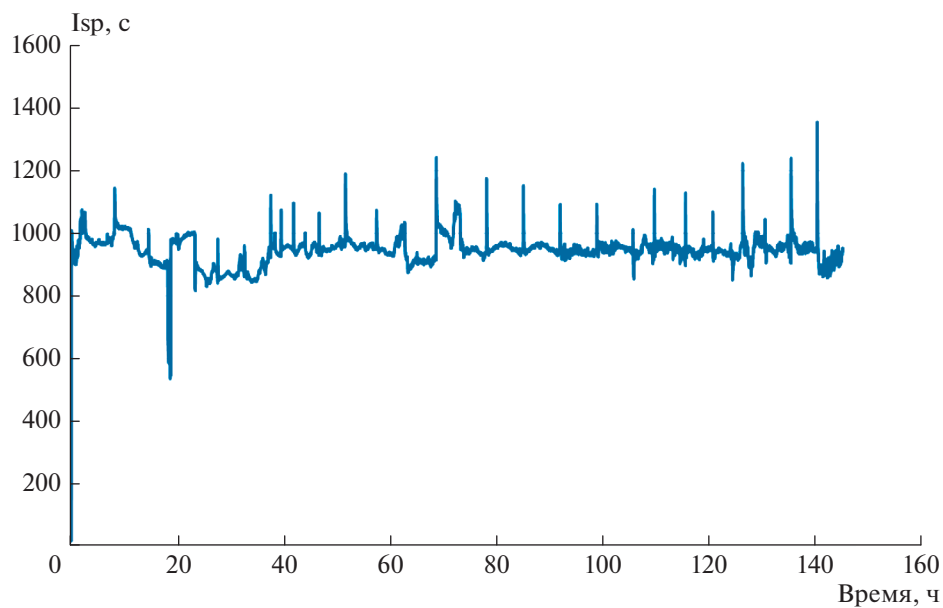


Рис. 10. Изменение удельного импульса тяги ЭО ЭРД ММ в процессе наработки на криптоне.

– средние значения тяги при эрозионных испытаниях на ксеноне с разрядным напряжением 225 В и мощностью (190–200) Вт составили (11.5 ± 0.3) мН, тягового КПД – (0.3 ± 0.05) , среднее значение полного удельного импульса тяги 1070 ± 50 с.

Из полученных результатов важнейшим представляется то, что зоны эрозии стенок выходной части разрядной камеры остаются в пределах расширенной части ускорительного канала как при работе на ксеноне, так и при работе на криптоне. Поэтому можно рассчитывать на то, что предусмотренные в конструкции модели СПД-40М запасы на износ стенок могут быть использованы в полной мере. Поэтому ресурс разработанной конструкции двигателя может быть достаточно большим. Действительно, для оценки ресурса двигателя, который может быть разработан на основе модели СПД-40М, можно сопоставить измеренные скорости износа в модели СПД-40М с полученными при ресурсных испытаниях двигателя СПД-100 при близких расширениях выходной части ускорительного канала около 30 градусов на сторону. Как было показано ранее, максимальные значения этих скоростей при работе модели СПД-40М на ксеноне не превышают 6 мкм/ч, а при работе на криптоне – 7 мкм/ч. При ресурсных испытаниях двигателя СПД-100 при расширении выходной части его ускорительного канала из-за их износа примерно на 30 градусов по каждой стенке максимальные скорости износа составляли 3.5–4 мкм/ч [15]. При одинаковых закономерностях износа стенок в СПД-100 и в СПД-40М можно ожидать такого же соотношения скоростей износа и в дальнейшем. Поэтому ожидаемый ресурс двигателя, который может быть создан на основе модели СПД-40М, может составлять не менее половины ресурса двигателя СПД-100, составляющего более 7000 ч. Это позволяет заключить, что ресурс СПД малой мощности на основе модели СПД-40М, работающего на приведенных выше режимах работы может составить не менее 3500 ч.

С учетом возможного эффекта “магнитной защиты” стенок он может быть еще больше [16]. Таким образом, представляется возможным заключить, что в результате данной работы созданы предпосылки для обеспечения большого ресурса СПД малой мощности, работающего на ксеноне или криптоне.

К сказанному следует добавить, что достаточно привлекательными являются и тяговые характеристики модели СПД-40М. Так, значения ее тягового КПД и удельного импульса тяги выше, чем у двигателей СПД-50 или СПД-50 М на режимах работы с мощностями не более 200 Вт на ксеноне и 250 Вт на криптоне [8]. Таким образом, в результате выполненного исследования получены обнадеживающие результаты для разработки СПД малой мощности, который может достаточно эффективно и длительно работать на мощности 200 Вт на ксеноне и 250 Вт – на криптоне [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в данной статье результаты свидетельствуют о том, что могут быть созданы достаточно эффективные СПД малой мощности, способные длительно работать при мощностях разряда около 200 Вт на ксеноне и около 250 Вт – на криптоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козубский К.Н., Мурашко В.М., Рылов Ю.П., Трифонов Ю.В., Ходненко В.П., Ким В., Попов Г.А., Обухов В.А. и др. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 3. С. 277–292.
2. Dan Lev, Roger M. Myers, Kristina M. Lemmer et al. Nhe technological and Commercial Expansion of Electric Propulsion in the past 24 years // paper IEPC 2017 – 242, Proc. 35th International Electric Propulsion Conference, October 8–12, 2017, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.
3. ОКБ “Факел”. Новый рекорд довыведения КА EUTELSAT двигателями SPT-140 [Электронный ресурс] // официальный сайт Государственной корпорации по космической деятельности “Роскосмос”. URL; <https://www.roscosmos.ru/24291/> (дата обращения: 10.10.2018).

4. Kim V., Grdlichko D., Kozlov V., Popov G., Skrylnikov A. Investigation of SPT performance and particularities of its operation with Kr and Kr/Xe mixtures // paper IEPC-01-065. Proceedings of the 27th International Electric Propulsion Conference, Pasadena, October 15–19, 2001, USA.
5. Ducci C., Andreussi T., Arkhipov A., Passaro A., Andrenucci M., Bulit A., Edwards C. Investigation of a 5 kW Hall-Effect Thruster Operating with Different Xenon-Krypton Mixtures // paper IEPC - 2015-126/ISTS-2015-b-126. Proceedings of the 30th International Symposium on Space Technology and Science, 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium, July 4–10, 2015. Kobe, Hyogo, Japan.
6. Ким В.П., Захарченко В.С., Меркурьев Д.В., Смирнов П.Г., Шилова Е.А. О влиянии расхода ксенона и криптона на тяговую эффективность стационарных плазменных двигателей Морозова // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 1. С. 14–24.
7. Kim V., Sidorenko E.K. ON THE STATIONARY PLASMA THRUSTER SCALING LAWS // paper in the Proceedings of the Space Propulsion Conference 2010, San Sebastian, 3–6 May, 2010.
8. Жасан В.С., Ким В.П., Меркурьев Д.В., Мурашко В.М., Нестеренко А.Н., Попов Г.А., Потанин М.Ю., Смирнов П.Г., Шилова Е.А. // Известия РАН. “Энергетика”. 2016. № 2. С. 66–79.
9. Saevets P.A., Grdlichko D.P., Kim V.P., Merkur'ev D.V., Smirnov P.G. Investigation of a Low-power Thruster on Krypton Propellant. Procedia Engineering 185. 2017. P. 85–90.
10. Ким В.П. Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 3. С. 45–59. (Kim V.P. // Technical Physics. 2015. V. 60. № 3. P. 362–375 © Pleiades Publishing, Ltd., 2015).
11. Ким В.П. О продольном распределении электрического поля в зонах ускорения плазменных ускорителей и двигателей с замкнутым дрейфом электронов // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 4. С. 406–418.
12. Hofer R., Kamhavi H., Herman D. et al. Development Approach and Status of the 12.5 kW HERMES Hall Thruster for the Solar Electric Propulsion Technology Demonstration Mission // paper IEPC-2015-186 /ISTS-2015-b-186. 30th International Symposium on Space Technology and Science, 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium. July 4–10, 2015. Kobe, Hyogo, Japan.
13. Conversano R., Goebel D., Hofer R., Mikellides I., Wirz R. Magnetically Shielded Miniature Hall Thruster: Development and Performance Analysis of MaSMi v.2 // paper IEPC-2015-100/ISTS - 2015b-100. 30th International Symposium on Space Technology and Science, 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium. July 4–10, 2015. Kobe, Hyogo, Japan.
14. Raites Y., Fisch N.J., Ertmer K., Burlingame C.B. "A Study of Cylindrical Hall Thruster for Low Power Space Application." Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton University, Princeton, NJ, USA, Paper PPPL-3479, 2000.
15. Arkhipov B.A., Bober A.S., Gnizdor R.Y., Kozubsky K.N., Koryakin A.I., Maslennikov N.A., Pridanikov S.Yu. THE RESULTS OF 7000-HOUR SPT-100 LIFE TESTING // paper IEPC-1995-039. 24th International Electric Propulsion Conference, Sept, 1995. Moscow, Russia.

Investigation of the Possibility to Develop a Competitive Plasma Thruster Operating with Xenon and Krypton

D. P. Hrdlichko^{a,*}, V. S. Zakharchenko^a, V. G. Kalyasin^a, V. P. Kim^a, M. V. Korkunov^b, V. A. Lesnevsky^b, D. V. Merkur'ev^a, G. A. Parakhin^b, G. A. Popov^a, and E. A. Shilov^a

^aResearch Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics of Moscow Aviation Institute
(National Research University), Moscow, Russia

^bExperimental design bureau Fakel, Moscow, Russia

*e-mail: riame4@sokol.ru

Results of investigation of the possibility to develop a competitive low power Stationary Plasma Thruster (SPT) are represented in the paper. Particularly it is shown that due to the necessity to reduce thruster sizes the performances of low power SPT are reduced and it is more difficult to ensure large thruster life time. It is shown also that there are known different approaches to solve this problem. An approach which was used during the SPT-100 and SPT-140 development is used also in this investigation. According to this approach the ionization and acceleration layer (IAL) is shifted outside of thruster design by increase of the magnetic field gradient and by shifting the magnetic induction distribution maximum along the accelerating channel mid surface in the exit direction. Additionally there is used the widening of the accelerating channel exit part to reduce influence of plasma–wall interaction on

the IAL thickness. It was expected that combination of these solutions will allow to position IAL and wall erosion zone outside of the minimal surface surrounding the magnetic system. As result it should be possible to increase the walls thickness margin for their erosion to increase thruster life time. Characteristics investigation and erosion tests of the SPT-40M developed using the described approach had shown that it is possible to position IAL and the wall erosion zones fully out of the mentioned minimal surface surrounding the magnetic system and to obtain satisfactory SPT-40M model thrust efficiency and specific impulse while it is operating with power 200 W with Xenon and with power 250 W with Krypton. Obtained wall erosion rates and increased wall thicknesses in the SPT-40M confirm the possibility to develop on its base the low power SPT with large life time.

Keywords: Stationary Plasma Thruster, development, propellant, xenon, krypton, characteristics, wall erosion, lifetime