

Стационарный плазменный двигатель малой мощности

10, октябрь 2013

DOI: 10.7463/1013.0640392

Бугрова А. И., Бугров Г. Э., Давыдов В. А., Десятсков А. В.,
Козинцева М. В., Сафронов А. А., Смирнов П. Г., Харчевников В. К.,
Шапошников М. И., Пильников А. В.

УДК 533.9.07

МГТУ МИРЭА, Москва, Российская Федерация
ФГУП ЦНИИмаш, Королев, Российская Федерация

bugrova@mirea.ru

desyatskov@yandex.ru

kozintseva@mirea.ru

mctitejl@yandex.ru

ВВЕДЕНИЕ

Стационарные плазменные двигатели (СПД) находят широкое применение на борту современных космических аппаратов (КА). В настоящее время значительно вырос интерес к СПД малой мощности (меньше 200 Вт) как в России [1-5], так и за рубежом [6-9].

Это связано, в основном, с расширением работ по созданию малых КА нового поколения, которые могут быть использованы для решения задач телекоммуникации и дистанционного зондирования Земли. Функции, которые выполняет СПД на борту КА – это коррекция орбит КА, удержание его на заданной орбите, сохранение нужной ориентации аппарата в пространстве.

Создание современных стационарных плазменных двигателей малой мощности идет как по пути масштабирования двигателей классической схемы, так и на основе модификации их магнитной системы. В первом случае работы выполняются в кооперации ОКБ “Факел” с Исследовательским центром им. М.В. Келдыша [1, 4]. Во втором случае работы выполняются ОКБ “Факел” совместно с НИИ прикладной механики и электродинамики [2]. Многочисленные экспериментальные данные в приведенных публикациях показали, что с уменьшением потребляемой СПД мощности тяговый к.п.д. классических СПД (отличительной особенностью данных двигателей является наличие в

их конструкции магнитных экранов) снижается и при мощностях 100 – 200 Вт не превышает 30%. Это иллюстрирует рис. 1, на котором изображена зависимость тягового к.п.д. от мощности, потребляемой двигателем для параметрического ряда СПД – 25, 35, 50, 60, 70, 100, разработки ОКБ “Факел”. Первая точка на рисунке соответствует двигателю СПД – 25, последняя СПД – 100. Из рисунка видно, что у двигателя СПД – 25 к.п.д. на 30% меньше, чем у СПД – 100.

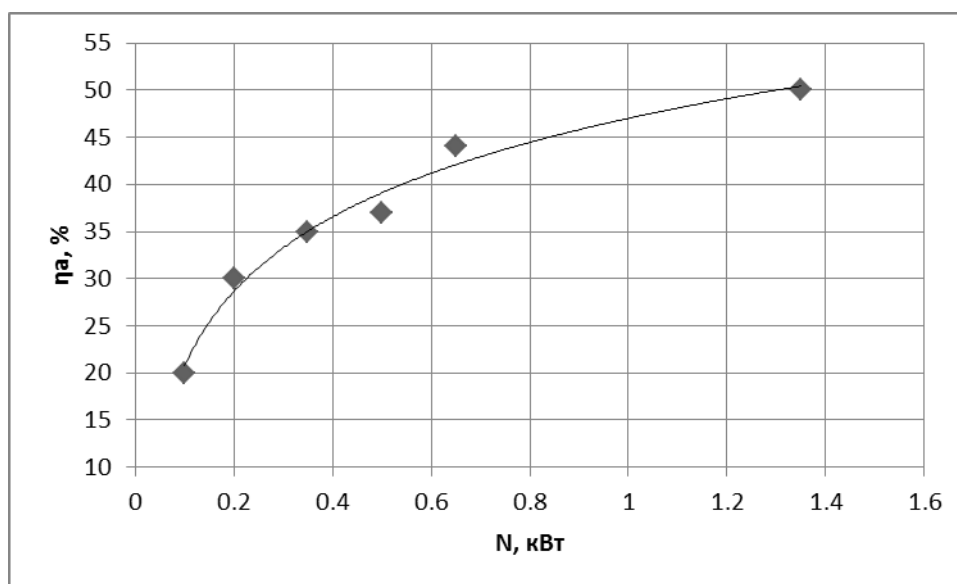


Рис. 1. Зависимость тягового к.п.д. от мощности, вкладываемой в СПД

В МГТУ МИРЭА при конструировании плазменных двигателей, потребляющих малую мощность использовался как метод масштабирования, основанный на критерии Меликова – Морозова, подробно описанном в публикациях [10, 11], так и метод оптимизации магнитного поля, запатентованный в 1999 г. [12]. Целью настоящей работы является экспериментальная проверка возможности повышения эффективности двигателя малой мощности с помощью указанных методов.

1. ОПТИМИЗАЦИЯ МОДЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Как показывают расчеты при мощности, потребляемой СПД, равной 150 Вт, с учетом того, что при хорошей работе СПД разрядный ток (измеряемый в амперах) меньше расхода (измеряемого в мг/с), необходим расход ксенона через анод $\sim (0.7- 0.9)$ мг/с. Разрядное напряжение должно быть порядка 170 – 200 В.

При таких входных параметрах снижение эффективности классических двигателей, потребляющих малую мощность по сравнению с СПД средней мощности (1 – 1.5 кВт) можно объяснить следующим образом.

Для дальнейших рассуждений введем следующие обозначения:

- тяговый КПД η_T - КПД двигателя, рассчитанный по полной вкладываемой мощности N : мощность разряда N_p плюс мощность потребляемая магнитными катушками N_k ;

- анодный КПД η - КПД двигателя, рассчитанный только по вкладываемой мощности в разряд N_p ;

- параметр обмена $\xi = \frac{I_p}{I_m}$ - характеризует эффективность протекания тока в канале,

где J_p – разрядный ток, I_m – массовый ток, равный $\frac{e}{M} \dot{m}$, где e – заряд электрона, M – масса атома, $\dot{m}$ – расход рабочего вещества.

Как известно из приведенных выше работ, тяговый к.п.д. двигателя связан с эффективностью процесса ионизации, который можно охарактеризовать коэффициентом использования газа μ , потерями напряжения на ионизацию атомов ксенона ΔU и параметром обмена ξ , который определяет величину разрядного тока

$$\eta_a = \frac{F^2}{2\dot{m}_a(N_p + N_k)}, \quad (1)$$

где $\dot{m}_a$ – расход газа через анод. Здесь тяга развиваемая двигателем равна

$$F = \mu \dot{m}_a \sqrt{\frac{2e}{M} (U_p - \Delta U)}, \quad (2)$$

где M – масса иона ксенона, U_p – разрядное напряжение. Мощность разряда:

$$N_p = I_p U_p, \quad (3)$$

$$\text{где } I_p = \xi I_m, \quad (4)$$

$$I_m = \frac{e}{M} \dot{m}_a,$$

N_k – мощность, потребляемая катушками намагничивания:

$$N_k = I_B U_B + I_H U_H, \quad (5)$$

где I_B, I_H – токи во внутренней и наружной катушках, U_B, U_H – напряжения, подаваемые на катушки.

Удельный импульс определяется соответственно по формуле:

$$P = \frac{F}{\dot{m}_a g}, \quad (6)$$

где g – ускорение свободного падения. Важной характеристикой для любого СПД является цена тяги, которая определяется как:

$$Ct = \frac{N}{F} \quad (7)$$

где $N = N_p + N_k$ – суммарная мощность, потребляемая двигателем. Ct определяет какая мощность тратится на 1 мН тяги.

μ , ΔU и ξ зависят от одного параметра подобия β , который, в свою очередь зависит от расхода и радиальных размеров разрядного канала ускорителя [10]:

$$\beta = \frac{\dot{m}_a}{\pi(D_H - b)} \quad (8)$$

где D_H – внутренний диаметр наружного канала, b – ширина канала.

Экспериментально установлено, что если β приближается к величине $2 \cdot 10^{-2}$ мг/с*мм, то значения μ и ξ стремятся к единице, ΔU – к цене ионизации, которая для ксенона составляет ~ 50 эВ, что равно примерно четырехкратному потенциалу ионизации атома ксенона. При этом эффективность работы СПД максимальна.

Получить такое большое значение β для моделей малой затруднительно. Даже для расхода $\dot{m}_a = 0.8 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$, $b = 8$ мм, $D_H = 26$ мм получим $\beta = 1.4 \cdot 10^{-2} \frac{\text{мг}}{\text{с*мм}}$. Эта величина

параметра подобия достаточна для эффективной работы двигателя [11].

Однако реализовать конструкцию с таким малым диаметром разрядной камеры при использовании традиционных материалов достаточно сложно. Действительно, для эффективной работы двигателя любых размеров необходимо, чтобы на срезе величина радиальной компоненты магнитного поля была ~ 0.02 Тл.

Исходя из анализа приведенных выше рассуждений, была создана принципиально новая магнитная система двигателя, позволяющая получать фокусирующую геометрию

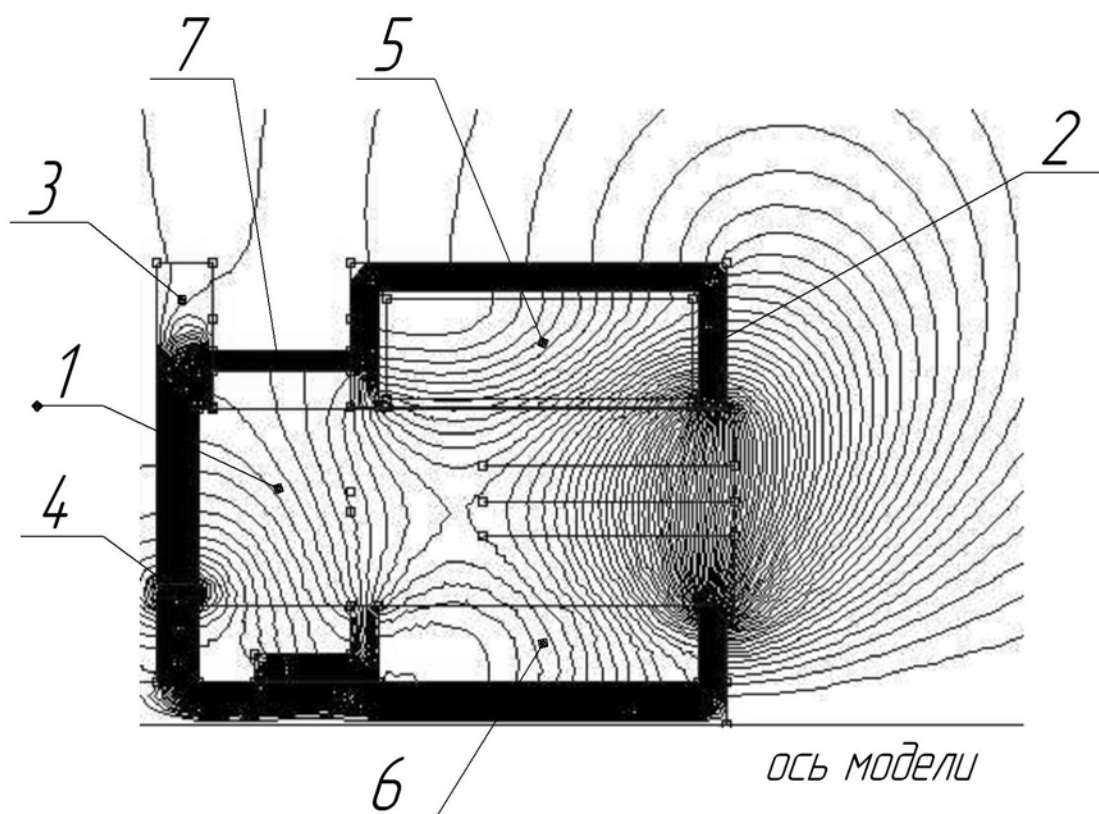
магнитного поля в канале двигателя и разработана конструкция СПД малой мощности нового поколения без магнитных экранов, рассчитаны ее габаритные размеры и размеры элементов конструкции.

Для создания заданной фокусирующей геометрии магнитного поля в канале двигателя необходимы как минимум две катушки намагничивания – внутренняя и наружная. Эти катушки запитываются от автономных источников, так как токи в них для получения необходимой величины магнитного поля должны быть значительно больше тока разряда, и мощность, потребляемая катушками намагничивания, дает существенный вклад в суммарную мощность $N_{\Sigma} = N_p + N_k$, потребляемую СПД. Внутренняя катушка

наматывается на сердечник. Расчеты показывают, что минимальный радиус сердечника, при котором нет насыщения железа составляет ~ 3 мм. При четырехслойной намотке внутренней катушки проводом ПОЖ с диаметром жилы 1 мм необходима высота намотки 5 мм. Кроме указанных размеров для обеспечения ресурса в 2500 часов с использованием керамики БГП-10 толщина стенки внутреннего изолятора должна быть не менее 3 мм. Таким образом, минимальный диаметр разрядной камеры при ширине канала 8 мм равен $D_H = 38$ мм. При этом критериальный коэффициент для расхода 0.8 мг/с равен $\beta = 0.008 \frac{\text{мг}}{\text{с} \cdot \text{мм}}$.

Эта величина меньше необходимой и этим объясняется уменьшение к.п.д. двигателей малой мощности, что подтверждается экспериментально. Приведенные формулы и комментарии к ним относятся как к классическим СПД, так и к СПД нового поколения. Однако в СПД нового поколения типа АТОН [11] можно эффективно формировать оптимальную конфигурацию силовых линий магнитного поля внутри канала. Это обусловлено, в основном, отсутствием магнитных экранов, которые характерны для классических СПД.

Моделирование магнитного поля проводилось с помощью стандартной компьютерной программы с использованием табличных характеристик магнитных материалов двигателя. Определялось положение полюсов магнитопровода, плотности токов во внутренней и наружной катушках намагничивания, толщина полюсов, а также положение и размер магнитной «дырки» в заднем фланце модели, наличие которой необходимо для моделей нового поколения типа « α » [12]. В результате была получена конфигурация силовых линий магнитного поля модели, изображенная на рис. 2.



1 -буферный объем, 2 – передний фланец, 3 – задний фланец, 4 – магнитная “дырка”, 5 – наружная катушка, 6 – внутренняя катушка, 7 – шпилька.

Рис. 2 Конфигурация силовых линий модели α-40

Этот рисунок соответствует плотностям токов во внутренней катушке $j_{кв}=2.4 \frac{MA}{M^2}$ и наружной $j_{кн}=0.9 \frac{MA}{M^2}$. При этом B_r – компонента поля на срезе модели по средней линии канала $B_r=0.0182$ Тл, а на расстоянии 10 мм от среза вглубь канала $B_r=0.0092$ Тл, то есть градиент поля на срезе по средней линии канала составляет $0.9 \frac{Тл}{м}$. Эти величины близки к оптимальным.

Магнитная “дырка” представляет собой кольцо из немагнитной нержавеющей стали, вставленной в задний фланец модели. Она нужна для формирования симметричной конфигурации силовых линий магнитного поля с помощью только двух катушек намагничивания. Как видно из рисунка в модели реализован “фигурный” магнитопровод, позволяющий уменьшить ее габариты.

При эквипотенциализации силовых линий магнитного поля можно считать, что поток ионов движется почти перпендикулярно касательным к ним. Из симметрии картины силовых линий, изображенных на рис. 2 следует, что поток ионов в канале ускорителя будет симметричным. В отличие от классических СПД здесь имеется сепаратриса магнитных силовых линий. Положение нуля магнитного поля совпадает с точкой пересечения ветвей сепаратрисы. Таким образом система является фокусирующей для ионного потока, и струя на выходе из модели оторвана от стенок изоляторов. Все это приводит к повышению к.п.д. анодного блока СПД типа α .

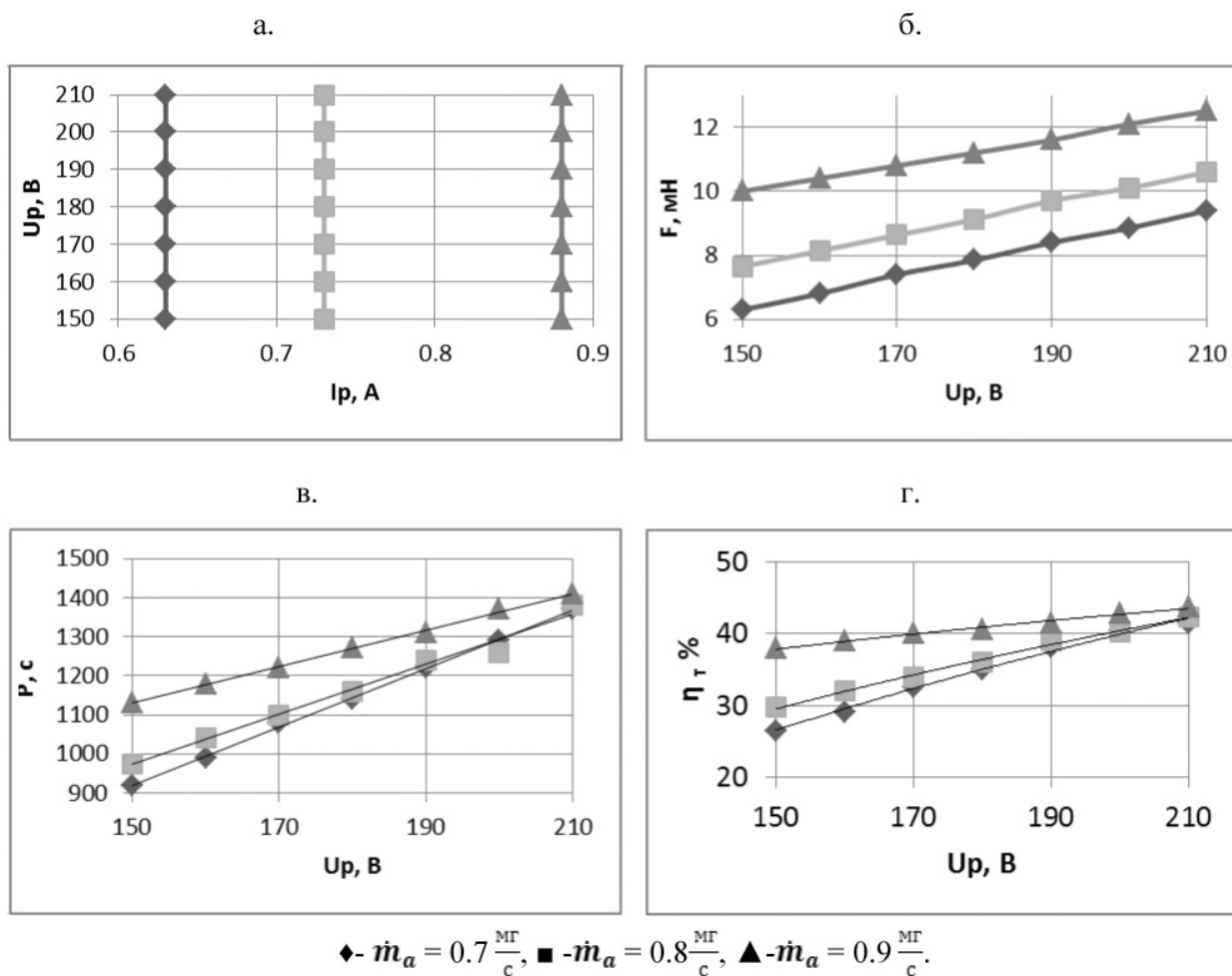
В результате проведенной работы была сконструирована и изготовлена лабораторная модель двигателя $\alpha - 40$. Габаритные размеры модели: диаметр ~ 70 мм, длина ~ 60 мм. Модель была испытана как на стенде МГТУ МИРЭА, так и на стенде ОКБ “Факел”. Экспериментально измеренные интегральные параметры, полученные на обоих стендах, практически совпали.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ α -40 И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Интегральные характеристики лабораторной модели α -40 измерялись на стендах, вакуумные камеры которых откачивались диффузионными насосами. Приведём интегральные параметры, полученные на стенде ОКБ “Факел”. Анодный расход ксенона в экспериментах изменялся в пределах $\dot{m}_a = (0,7 - 0,9) \frac{\text{мг}}{\text{с}}$. Катодный расход ксенона составлял $\dot{m}_k = (0,1 - 0,12) \frac{\text{мг}}{\text{с}}$. При этом динамическое давление не превышало $1 \cdot 10^{-4}$ Торр по воздуху. Потребляемая моделью суммарная мощность, включающая мощность, затрачиваемую на катушки намагничивания, изменялась в диапазоне от 125 Вт до 200 Вт.

Для трёх расходов ксенона $\dot{m}_a = 0,7 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$, $0,8 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$, $0,9 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$ измерялись вольтамперные характеристики разряда и тяга, создаваемая двигателем. Токи в катушках намагничивания подбирались по минимуму разрядного тока. Оказалось, что для всех анодных расходов, токи во внутренней и наружной катушках равны $I_b = I_n = 5$ А. По формулам (1-6) рассчитывался тяговый к.п.д., с учетом суммарной потребляемой мощности анодного блока $N = N_p + N_k$ и удельный импульс. На рис. 3 приведены вольтамперные характеристики разряда (а), зависимость тяги (б), удельного импульса (в) и тягового к.п.д. (г) от разрядного напряжения для трёх указанных анодных расходов. Из рисунка 3(а) видно, что вольтамперные характеристики разряда для всех расходов практически вертикальны, что характеризует хорошую степень ионизации атомов ксенона. Тяга и удельный импульс (Рис. 3 б,в) монотонно возрастают с ростом напряжения разряда по

линейному закону. Максимальные значения тяги, полученные при $U_p=210$ В равны 9,4 мН, 10,6 мН и 12,5 мН для расходов $0,7 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$, $0,8 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$ и $0,9 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$, соответственно. Удельный импульс при этом напряжении равен 1370 с, 1380 с и 1410 с и тяговый к.п.д достигает величины $\eta_T = 43,8\%$ при расходе $0,9 \text{ мг/с}$. Однако мощность, потребляемая ускорителем при этом расходе превышает 150 Вт. Это видно из рис. 4, где для этих режимов изображены кривые зависимости к.п.д. и удельного импульса P от суммарной мощности N . Из этого рисунка видно, что при расходе ксенона $\dot{m}_a = 0,7 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$ и напряжении 210 В суммарная мощность не превышает 150 Вт, при этом к.п.д. равен $\eta_T \geq 41\%$, удельный импульс достигает значения $P=1370$ с, тяга равна 9,4 мН. Другим режимом с мощностью $N_{\Sigma}=150$ Вт является режим с расходом $0,8 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$, $\eta_T \approx 40\%$, $P=1250$ с, $F=9,7$ мН, $U_p=190$ В.

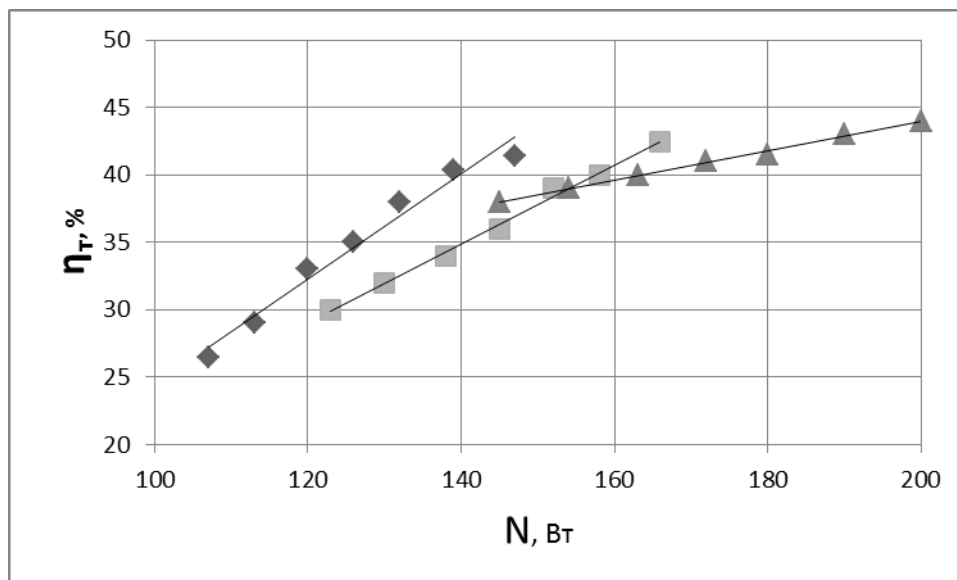


Стенд ОКБ “Факел”, давление в камере $1 \cdot 10^{-4}$ Торр. Расход через катод

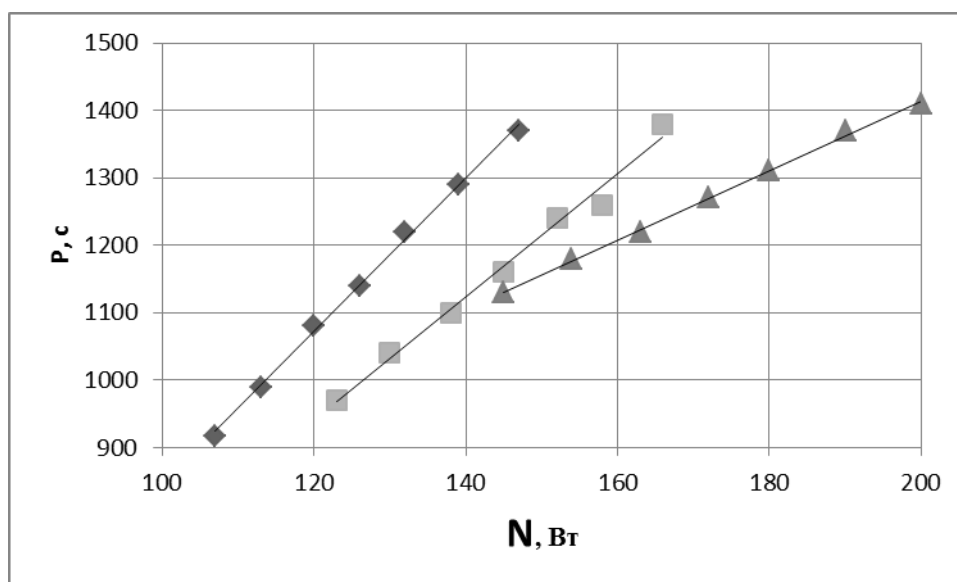
$$\dot{m}_k = 0,12 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$$

Рис. 3. Зависимость интегральных характеристик модели α -40 от напряжения и расхода

а.



б.



◆- $\dot{m}_a = 0.7 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$, ■- $\dot{m}_a = 0.8 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$, ▲- $\dot{m}_a = 0.9 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$.

Рис. 4. Зависимость тягового к.п.д. (а) и удельного импульса (б) двигателя α-40 от мощности, для разных расходов ксенона.

3. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Было проверено влияние величины магнитного поля на интегральные параметры α-40 при входных параметрах $\dot{m}_a = 0.8 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$, $U_p = 180 \text{ В}$. Для этого изменялись токи в катушках

намагничивания от 3 А до 5 А с шагом 0.5 А, причём как во внутренней, так и в наружной катушках токи были одинаковы, поэтому конфигурация силовых линий не менялась.

На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости разрядного тока (а), суммарной мощности, потребляемой СПД (б), отношения мощности, потребляемой катушками намагничивания к мощности разряда (в) и параметра обмена (г) от тока в катушках намагничивания. Из рисунка видно, что с увеличением магнитного поля ток разряда и, соответственно, суммарная мощность, потребляемая СПД сначала резко падают, а затем выходят на «полку». Относительная доля мощности, потребляемая катушками намагничивания, растет практически по линейному закону (в). Параметр обмена асимптотически убывает до значения 1.23 (г).

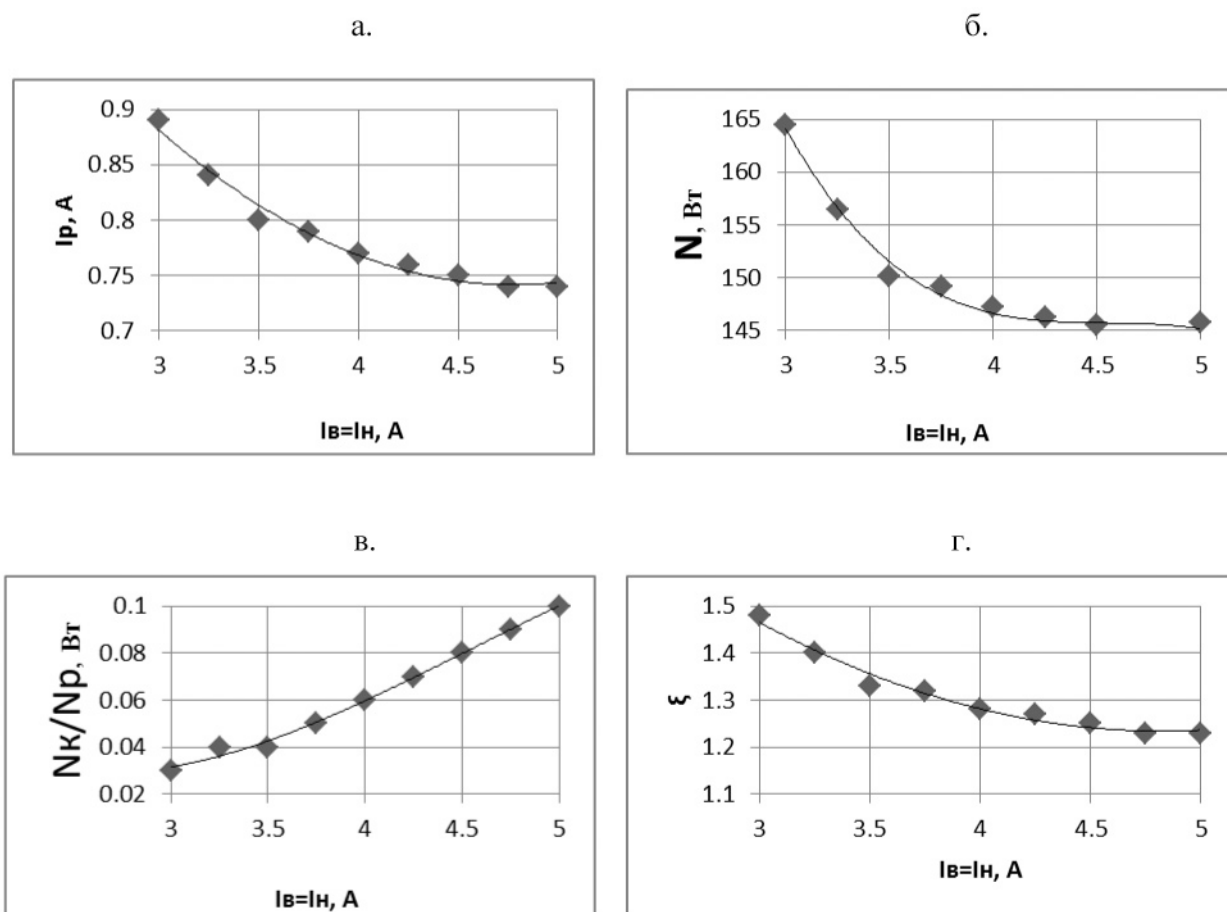


Рис. 5. Зависимость тока разряда (а), суммарной вкладываемой мощности (б), относительной мощности, потребляемой катушками намагничивания (в) и параметра обмена (г) от величины тока в катушках намагничивания, $\dot{m}_a = 0.8 \frac{мг}{с}$, $U_p = 180 В$

В каждой экспериментальной точке была измерена тяга и рассчитаны зависимости удельного импульса, тяги и к.п.д. η_a от токов в катушках намагничивания. Эти кривые представлены на рис. 6 а, б. Обращает на себя внимание тот факт, что тяга и, соответственно, удельный импульс в указанном диапазоне изменения величины магнитного поля меняются незначительно (а). На рис. 6 (б) представлены η_a – анодный к.п.д. и η_T – тяговый к.п.д. в зависимости от токов в катушках намагничивания. Из рисунка видно, что η_T сначала резко возрастает достигая максимума, а затем незначительно падает, в то время как η_a монотонно возрастает и выходит на «полку». Поэтому снижение эффективности работы модели η_T можно объяснить увеличением разогрева катушек намагничивания при пропускании через них большего тока. На том же рисунке показано как меняется уровень колебаний разрядного тока (в) и цена тяги (г).

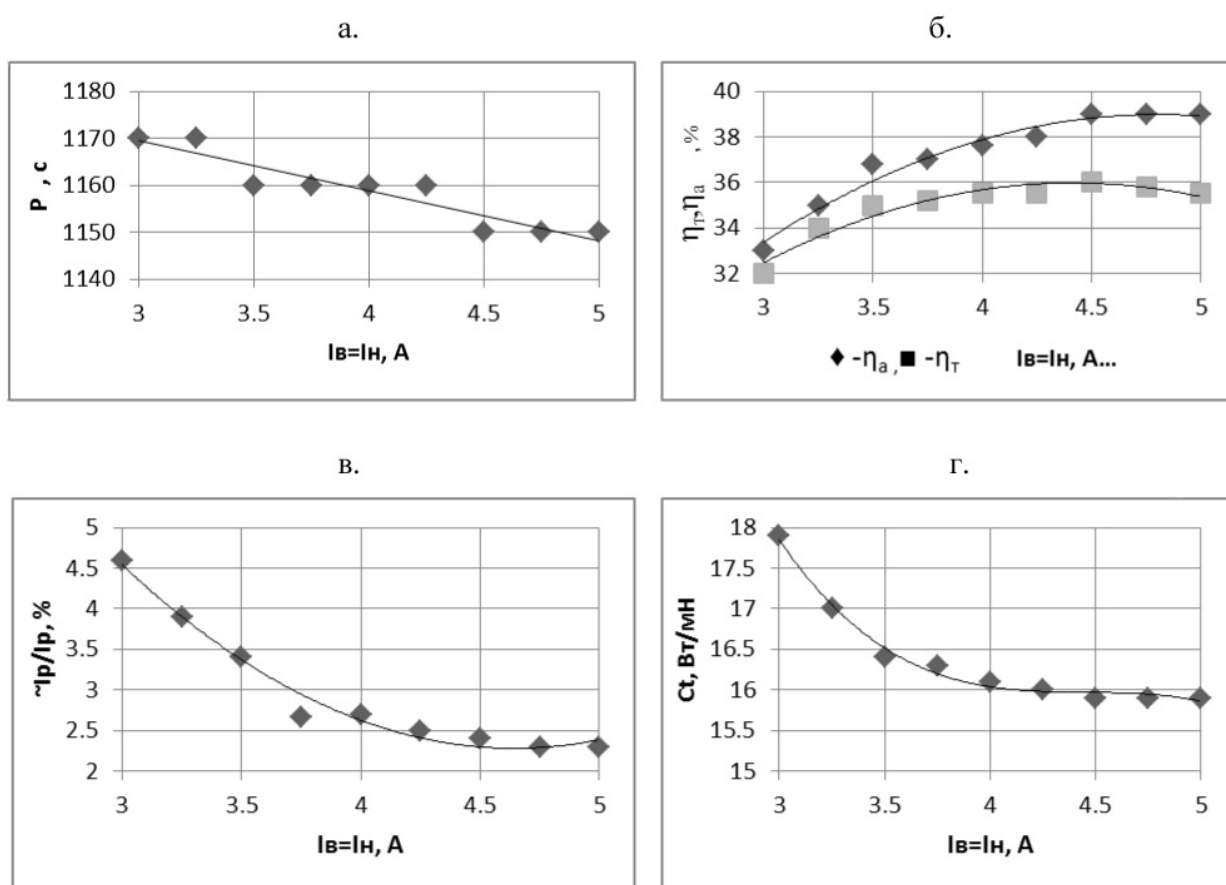


Рис. 6. Зависимость удельного импульса P(а), η_a и η_T (б), отношения переменной составляющей разрядного тока к постоянной (в) и цены тяги (г) от величины магнитного

$$\text{поля, } \dot{m}_a = 0.8 \frac{\text{мг}}{\text{с}}, U_p = 180 \text{ В}$$

Из этих рисунков следует, что при увеличении токов в магнитных катушках до оптимальных значений (минимум разрядного тока) эффективность работы двигателя по основным параметрам возрастает.

Объяснить поведение интегральных параметров с увеличением тока в магнитных катушках, а значит с увеличением магнитного поля в зоне ионизации, можно, исходя из следующих соображений. Плазменный поток, выходящий из СПД, является полностью ионизованной средой, состоящей из ионов ксенона первой и второй кратности и частиц, выпавших из ускорения. Доля последних может быть связана с различными причинами: пролёт без ионизации в ускорителе, гибель ионов на стенках и превращение их в нейтроны. Согласно [13] эти потоки связаны с интегральными параметрами соотношениями:

$$\begin{aligned}\dot{m}_a &= \dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_* \\ F &= \sqrt{\frac{2e}{M}(U_p - \Delta U)(\dot{m}_1 + \sqrt{2}\dot{m}_2)} \\ I_p &= \frac{e}{M}(1+k)(\dot{m}_1 + 2\dot{m}_2 + \dot{m}_*)\end{aligned}\tag{9}$$

где $\dot{m}$ – суммарный расход ксенона, $\dot{m}_1$ и $\dot{m}_2$ – поток однократно и двукратно ионизованных атомов, $\dot{m}_*$ – поток частиц, гибнущих на стенках, k – коэффициент, определяющий вклад сквозного тока в ток разряда ($k \approx 0,1$). На рис. 7 приведены зависимости $\dot{m}_1$, $\dot{m}_2$ и $\dot{m}_*$ от тока в катушках намагничивания ($J_b = J_n$), который меняется в пределах от 3А до 5А. Из рисунка видно, что при увеличении тока в катушках доля однократно ионизованных ионов возрастает от 31% до 64%, а доля ионов второй кратности убывает от 39% до 15%. Кроме того уменьшается доля частиц, гибнущих на стенках разрядной камеры. Уменьшение доли двухзарядных ионов и частиц, гибнущих на стенках, приводит к увеличению к.п.д. [1].

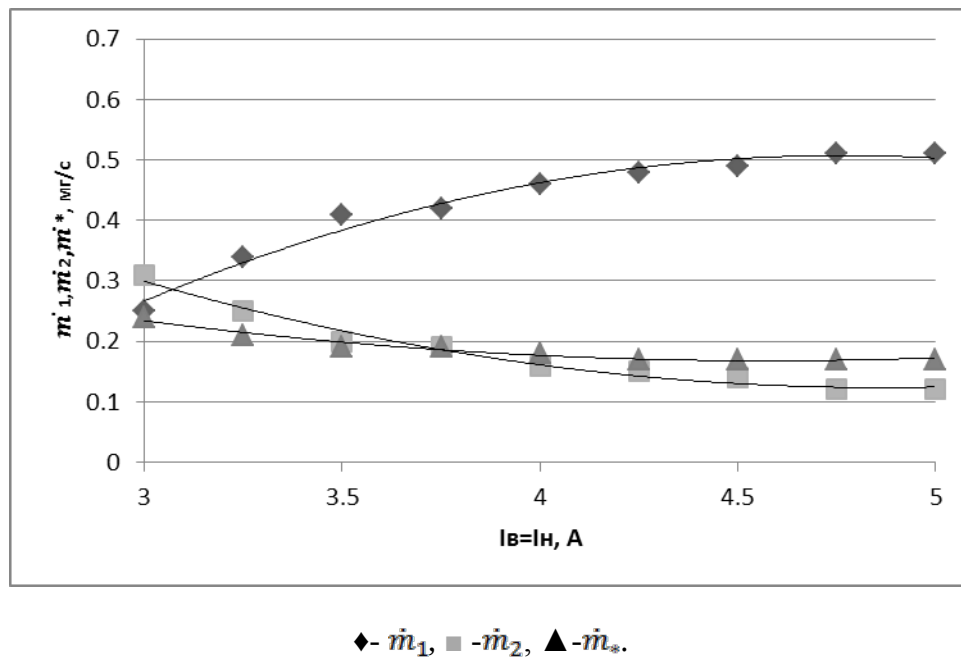


Рис. 7. Зависимость потока ионов первой, второй кратности ($\dot{m}_1, \dot{m}_2$) и частиц гибнущих на стенках ($\dot{m}_*$) от тока в катушках намагничивания.

4. РАСХОДИМОСТЬ СТРУИ. ПРОГНОЗИРУЕМЫЙ РЕСУРС

Важным параметром СПД является расходимость истекающей струи, которая определяется телесным углом, в который попадает 90% направленного потока ионов. Для классических моделей М-70 и СПД-100 полуугол расходимости составляет $\pm 45^\circ$.

Для определения расходимости модели α -40 были сняты профили направленного ионного тока на двойной зонд. В результате обработки этих кривых был получен полуугол расходимости, равный $\pm 25^\circ$, который существенно меньше, чем у классических моделей. Уменьшение расходимости струи у СПД типа АТОН, к разновидности которого относится α -40, объясняется смещением «центра тяжести» зоны ионизации вглубь канала. Это реализовано с помощью буферного объема, где происходит изотропизация нейтральных атомов, и создания фокусирующей геометрии силовых линий магнитного поля в канале. Следует отметить, что при уменьшении угла расходимости струи возможно увеличение ширины поясков эрозии как на наружном, так и внутреннем канале разрядной камеры. Это означает, что, возможно, расходимость струи влияет на ресурс двигателя.

По критериям ОКБ «Факел» ресурс определяется временем непрерывной работы двигателя, при котором толщина изоляторов на срезе становится равной нулю. Для расчёта толщины стенок изолятора по данному ресурсу необходимо определить скорость

эрозии на срезе в радиальном направлении. Были проведены кратковременные ресурсные испытания α -40, работающей в режиме $U_p=210$ В, $\dot{m}_a = 0,7 \frac{\text{мг}}{\text{с}}$ при вкладываемой мощности $N_{\Sigma} \approx 150 \text{Вт}$ в течение 50 часов. Эксперименты показали, что средняя скорость эрозии на срезе α -40 для внутренней стенки составила 3мкм/час, наружной – 2,25 мкм/час. По этим данным, используя логарифмическую аппроксимацию было получено, что для ресурса 2500 часов толщина внутренней керамики должна составлять 2,9 мм, наружной – 2,2 мм.

Сравнительные характеристики СПД малой мощности, разработанные разными организациями, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Модель (разработчик)		
	СПД-50М ОКБ“Факел”	α -40 МГТУ МИРЭА	ХНТ 100 НЕТ Alta S.p.A. Италия
Напряжение разряда, В	200	210	160
Ток разряда, А	0,72	0,63	1
Мощность (с учетом потерь в катушках), Вт	147,5	147	160
Тяга, мН	9,4	9,4	10
Удельный импульс, с	1090	1370	950
Тяговый к.п.д., %	34,2	41,4	31,2
Ресурс разрядной камеры, час	>1800	2500*	-

* - прогнозируемый ресурс.

Из Таблицы 1 видно, что модель α -40 разработки МГТУ МИРЭА обладает рядом преимуществ по сравнению с аналогичными СПД, разработанными как в РФ, так и за рубежом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты показали, что эффективность работы СПД малой мощности, разработанной в МГТУ МИРЭА выше, чем у известных аналогов. Так при вкладываемой мощности 150 Вт двигатель α -40 имеет максимальную эффективность $\eta_t = 41,4 \%$ и максимальный удельный импульс $P = 1370$ с. Кроме того, разработанная модель имеет существенно меньшую расходимость плазменной струи – 25° .

Работа выполнена при частичной поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009-2013 годы в рамках соглашений № 14.В37.21.1840 и № 14.В37.21.1291 с МИНОБРНАУКИ РФ.

Список литературы

1. Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / под ред. акад. РАН А.С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2008. С. 31-42; 184-189.
2. Козубский К.Н., Мурашко В.М., Рылов Ю.П., Трифонов Ю.В., Ходненко В.П., Ким В., Попов Г.А., Обухов В.А. СПД работают в космосе // Физика плазмы. 2003. Т. 29, № 3. С. 277-292.
3. Бугров Г.Э., Десятков А.В., Козинцева М.В., Липатов А.С. Интегральные параметры стационарного плазменного двигателя АТОН малой мощности в стационарном и “пулемётном” режимах // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 3(52). С. 69-74.
4. Беликов М.Б., Горшков О.А., Дышлюк Е.Н., Ловцов А.С., Шагайда А.А. Разработка холловского двигателя малой мощности с ресурсом до 3000 часов // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 3(52). С. 131-141.
5. Bugrova A.I., Desiatskov A.V., Kaufman H.R., et al. Design and experimental investigation of a small closed drift thruster // Proc. of the 27th International Electronic Propulsion Conference. 2001. IEPC-2001-344.
6. Polk J. Electric propulsion in the USA // Proc. of the 30th International Electronic Propulsion Conference (Florence, Italy, 2007). IEPC-2007-368.
7. Polzin K.A., Markusie T.E., Stanoev B.J., et al. Performance of a low power cylindrical Hall thruster // Proc. of the 29th International Electronic Propulsion Conference. 2005. IEPC-2005-011.
8. Biagioni L., Cesari U., Saverdi M. Development status of the HT-100 miniaturized hall effect thruster system // Proc. of the 41th Joint Propulsion Conference. 2005. AIAA-2005-3875.
9. Tahara H., Fujioka T., Kitano T. Optimization on magnetic field and acceleration channel for low power hall thrusters // Proc. of the 28th International Electronic Propulsion Conference, 2003. IEPC-2003-015.

10. Бугрова А.И., Масленников Н.А., Морозов А.И. Законы подобия интегральных характеристик в УЗДП // ЖТФ. 1991. Т. 61, вып. 6. С. 45-51.
11. Бугрова А.И., Десятков А.В., Липатов А.С., Сигов А.С., Корякин А.И., Мурашко В.М., Нестеренко А.Н. Экспериментальные исследования стационарных плазменных двигателей семейства АТОН // Физика плазмы. 2010. Т. 36, № 4. С. 395-400.
12. Бугрова А.И., Морозов А.И., Евтихий Н.Н. Плазменный ускоритель с замкнутым дрейфом электронов: пат. 2139647 РФ. 1999.
13. Бугрова А.И., Липатов А.С., Морозов А.И., Баранов В.И. Влияние соотношения долей ионов разной кратности на интегральные параметры (СПД) типа АТОН // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, вып. 21. С. 87-94.

Stationary plasma small-power thruster

10, October 2013

DOI: **10.7463/1013.0640392**

**Bugrova A.I., Bugrov G.E., Davydov V.A., Desyatskov A.V., Kozinceva M.V.,
Safronov A.A., Smirnov P.G., Harchevnikov V.K., Shaposhnikov M.I.,
Pil'nikov A.V.**

Russia, Moscow State Technical University MIREA

Russia, Korolev, FSUE «TsNIIMash»

bugrova@mirea.rudesyatskov@yandex.rukozintseva@mirea.rumctitejl@yandex.ru

In this paper results of experimental studies of integrated characteristics of a laboratory model of a stationary plasma thruster of new generation, which is α -40, calculated at the rate of total power consumption equaling 150 W were presented. Integrated parameters of this model, such as thrust, discharge current, specific impulse and efficiency obtained at test-benches of MSTU MIREA and OKB "Fakel" were almost identical. Thus, at the input power of ~ 150 W, voltage of 210 V, consumption of xenon of 0,7 mg/s, thrust appeared to be 9.4 mN, the anode specific impulse of thrust was equal to ~ 1370 s, and the anode efficiency, taking into account the power consumed by magnetic coils, equaled to 41%. Another mode with a bigger thrust (9.7 mN) but with a smaller specific impulse (1240 s) at the same input power was received at the consumption of xenon of 0.8 mg/s and voltage of 190 V. Efficiency was about 40%. The semi-angle of divergence of a plasma beam was equal to $\pm 25^\circ$. Predicted life expectancy was approximately 2500 hours. The data provided in the paper showed that α -40 is more efficient than any known analogues.

Publications with keywords: [plasma physics](#), [stationary plasma thruster](#)

Publications with words: [plasma physics](#), [stationary plasma thruster](#)

References

1. Gorshkov O.A., Muravlev V.A., Shagaida A.A. *Khollovskie i ionnye plazmennye dvigateli dlia kosmicheskikh apparatov* [Hall and ion plasma engines for spacecrafts]. Moscow, Mashinostroenie, 2008, pp. 31-42; 184-189.

2. Kozubskiy K.N., Murashko V.M., Rylov Yu.P., Trifonov Yu.V., Khodnenko V.P., Kim V., Popov G.A., Obukhov V.A. SPD rabotayut v kosmose [Stationary plasma thrusters operate in space]. *Fizika plazmy*, 2003, vol. 29, no. 3, pp. 277-292. (English Translation: *Plasma Physics Reports*, 2003, vol. 29, no. 3, pp. 251-266. DOI: 10.1134/1.1561120).
3. Bugrov G.E., Desyatskov A.V., Kozintseva M.V., Lipatov A.S. Integral'nye parametry statsionarnogo plazmennogo dvigatelya ATON maloy moshchnosti v statsionarnom i "pulemetnom" rezhimakh [Integral Parameters of ATON Low Thrust Plasma Engine in Stationary and Machine-Gun Modes]. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2008, no. 3(52), pp. 69-74.
4. Belikov M.B., Gorshkov O.A., Dyshlyuk E.N., Lovtsov A.S., Shagayda A.A. Razrabotka khollovskogo dvigatelya maloy moshchnosti s resursom do 3000 chasov [Development of Low Power Hall Engine with Service Life of up to 3000 Hours]. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2008, no. 3(52), pp. 131-141.
5. Bugrova A.I., Desiatskov A.V., Kaufman H.R., et al. Design and experimental investigation of a small closed drift thruster. *Proc. of the 27th International Electronic Propulsion Conference*, 2001, IEPC-2001-344.
6. Polk J. Electric propulsion in the USA. *Proc. of the 30th International Electronic Propulsion Conference*, Florence, Italy, 2007, IEPC-2007-368.
7. Polzin K.A., Markusie T.E., Stanoev B.J., et al. Performance of a low power cylindrical Holl thruster. *Proc. of the 29th International Electronic Propulsion Conference*, 2005, IEPC-2005-011.
8. Biagioni L., Cesari U., Saverdi M. Development status of the HT-100 miniaturized hall effect thruster system. *Proc. of the 41th Join Propulsion Conference*, 2005, AIAA-2005-3875.
9. Tahara H., Fujioka T., Kitano T. Optimization on magnetic field and acceleration channel for low power hall thrusters. *Proc. of the 28th International Electronic Propulsion Conference*, 2003, IEPC-2003-015.
10. Bugrova A.I., Maslennikov N.A., Morozov A.I. Zakony podobiya integral'nykh kharakteristik v UZDP [Similarity laws the integral characteristics of the accelerator with closed electron drift]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1991, vol. 61, no. 6, pp. 45-51.
11. Bugrova A.I., Desyatskov A.V., Lipatov A.S., Sigov A.S., Koryakin A.I., Murashko V.M., Nesterenko A.N. Eksperimental'nye issledovaniya statsionarnykh plazmennyykh dvigateley semeystva ATON [Experimental study of ATON stationary plasma thrusters]. *Fizika plazmy*, 2010, vol. 36, no. 4, pp. 395-400. (English Translation: *Plasma Physics Reports*, 2010, vol. 36, iss. 4, pp. 365-370. DOI: 10.1134/S1063780X10040069).
12. Bugrova A.I., Morozov A.I., Evtikhiev N.N. *Plazmennyy uskoritel' s zamknutym dreyfom elektronov* [Plasma accelerator with closed electron drift]. Patent RF, no. 2139647, 1999.
13. Bugrova A.I., Lipatov A.S., Morozov A.I., Baranov V.I. Vliyanie sootnosheniya doley ionov raznoy kratnosti na integral'nye parametry (SPD) tipa ATON [Effect of the ratio of differently charged ions on the integral parameters of stationary plasma thrusters of the ATON type]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2005, vol. 31, no. 21, pp. 87-94. (English Translation: *Technical Physics Letters*, 2005, vol. 31, iss. 11, pp. 943-946. DOI: 10.1134/1.2136960).