

УДК 621.455

## РАЗРАБОТКА СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ СПД-100ВТ С ПОВЫШЕННОЙ ТЯГОЙ

© 2019 г. В. П. Ким<sup>1</sup> \*, Р. Ю. Гниздор<sup>2</sup>, Д. П. Грдличко<sup>1</sup>, В. С. Захарченко<sup>1</sup>, М. В. Коркунов<sup>2</sup>,  
Д. В. Меркурьев<sup>1</sup>, Г. А. Попов<sup>1</sup>, Е. А. Шилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики МАИ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ОКБ Факел, г. Калининград, Россия

\*riame4@sokol.ru

Поступила в редакцию 25.03.2019 г.

После доработки 12.04.2019 г.

Принята к публикации 25.04.2019 г.

В статье представлены результаты исследования возможности разработки стационарного плазменного двигателя с повышенной тягой. Это исследование выполнено в научно-исследовательском институте прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (НИИПМЭ МАИ) совместно с опытным конструкторским бюро “Факел” (ОКБ “Факел”) в качестве промышленного партнера. В процессе исследования были разработаны и исследованы лабораторная модель, макетный и экспериментальный образцы двигателя СПД-100ВТ, имеющего основные размеры, близкие к размерам хорошо известного серийного двигателя СПД-100, производимого ОКБ “Факел” и успешно работающего в космосе. В результате показано, что двигатель СПД-100ВТ может эффективно и длительное время работать с разрядным напряжением 300 В и мощностью до 3 кВт, обеспечивая получение тяги, более чем вдвое превышающей тягу двигателя СПД-100, тягового коэффициента полезного действия выше 60% и удельного импульса тяги – более 1800 с. Увеличение тяги достигнуто увеличением расхода ксенона через двигатель, а повышение эффективности его работы – модернизацией магнитной системы и геометрии ускорительного канала двигателя.

DOI: 10.1134/S0023420619050030

### ВВЕДЕНИЕ

Стационарные плазменные двигатели (СПД) нашли широкое применение в космической технике. Чаще всего двигательные установки на основе СПД используют в системах коррекции орбит КА [1]. Использовались они и для перемещения исследовательского КА с околоземной на окололунную орбиту по Европейской программе Smart 1, а также для довыведения КА на геостационарную орбиту (ГСО), обеспечивая увеличение массы КА на названной орбите до 1.5–2 раз [2]. В России такая задача была впервые решена при выведении на ГСО двух ГКА увеличенной массы *Экспресс АМ5/АМ6* с использованием двигателей СПД-100 систем коррекции названных КА (*Экспресс – АМ6*. [Электронный ресурс] // Материалы с официального сайта АО “Информационные спутниковые системы” имени академика М.Ф. Решетнева. URL; <http://www.iss-reshetnev.ru/projects> дата обращения: 10.10.2018). Планируется и дальнейшее регулярное применение двигателей типа СПД-100 и СПД-140 разработки ОКБ “Факел” для решения этой задачи.

В США с 2010 г. СПД типа ВРТ 4000 используются для довыведения тяжелых КА на ГСО по программе *AEHF* [2]. С 2017 году начато решение задачи довыведения КА на ГСО и в Европе, когда КА *Eutelsat 172B* был штатно выведен на ГСО с помощью российских двигателей ОКБ “Факел” типа СПД-140 (ОКБ “Факел”. Новый рекорд довыведения КА *Eutelsat* двигателями SPT-140 // официальный сайт Государственной корпорации по космической деятельности “Роскосмос”. URL; <https://www.roscosmos.ru/24291/>, дата обращения: 10.10.2018).

Использование серийного двигателя СПД-100 с тягой в штатном режиме 83 мН ведет к длительному сроку довыведения, что нежелательно по целому ряду причин. В то же время использование СПД-140 (тяга – 280 мН) во многих случаях нецелесообразно из-за большой потребляемой мощности, составляющей 4.5 кВт на его номинальном режиме работы. А для работы с меньшими мощностями он будет переразмерен. Таким образом, представляется актуальной разработка двигателя с тягой в диапазоне (170–190) мН, потребляемой мощностью до 3 кВт, обладающим привлекательными массогабаритными характе-

ристиками. С учетом изложенного были исследованы возможности создания такого двигателя, и полученные при этом результаты приведены в данной статье.

### 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ СПД НА РЕЖИМАХ РАБОТЫ С ПОВЫШЕННОЙ ТЯГОЙ

Тяга двигателя может быть увеличена либо за счет увеличения, скорости истечения, либо массового расхода рабочего вещества (РВ) через двигатель. Увеличение скорости приводит к увеличению энергетической цены тяги и при фиксированной мощности, выделяемой на работу ДУ довыведения не дает возможности увеличить тягу. Поэтому самым простым способом увеличения тяги является повышение массового расхода РВ через двигатель. Однако при сохранении типоразмера двигателя встает вопрос обеспечения требуемого его ресурса, т.к. с увеличением расхода можно ожидать увеличения количества ускоренных ионов, бомбардирующих стенки ускорительного канала, и увеличения скоростей их износа, ограничивающих ресурс современных СПД.

Анализ показывает [3], что существует возможность существенно увеличить мощность и тягу двигателя за счет увеличения расхода РВ без значительного увеличения его основных размеров и при сохранении большого ресурса. Добиться поставленной цели можно, управляя так называемым слоем ионизации и ускорения (СИУ), в котором происходит основное падение потенциала в разряде СПД. Положение СИУ в разряде определяет потоки ионов на стенки и формирование зон эрозии и зависит от распределения магнитного поля [3–5]. Из упомянутых работ следует, что, чем больше градиент магнитного поля вдоль канала, тем меньше протяженность СИУ и, следовательно, зон эрозии. Поэтому желательно организовать высокую скорость нарастания магнитной индукции, а максимум распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности канала максимально вынести за плоскость полюсов магнитной системы [3–5]. И одной из задач данной работы являлось подтверждение реализуемости отмеченных возможностей.

Еще одним важным рычагом является расширение выходной части ускорительного канала путем профилирования стенок, например, в виде конических поверхностей [3, 6]. Основной идеей данного изменения является желание снизить потери ионов на стенках, а также тепловыделение на них. Такая возможность подтверждается тем, что за первые 1300–1500 ч наработки серийного СПД-100 стенки выходной части канала приобретают вследствие их эрозии форму, близкую к конической с углом раскрытия порядка 45° на сто-

рону [7]. При этом скорость износа снижается в несколько раз по сравнению с начальной, что свидетельствует о существенном уменьшении потока ускоренных ионов на стенки и выделяющейся на них энергии. Поэтому предварительное расширение выходной части ускорительного канала в зоне эрозии позволяет с самого начала работы двигателя снизить потоки ионов и энергии на стенки, обеспечивая возможность работы двигателя при повышенных расходах через ускорительный канал и мощностях разряда.

Третья возможность управления СИУ – это увеличение плотности расхода через ускорительный канал [3, 5, 6]. Так, в работе [6] показано, что известная формула Жаринова для толщины СИУ [8], отражающая условие стационарного его существования, может использоваться не только для качественных оценок, но и для количественных расчетов в следующем виде:

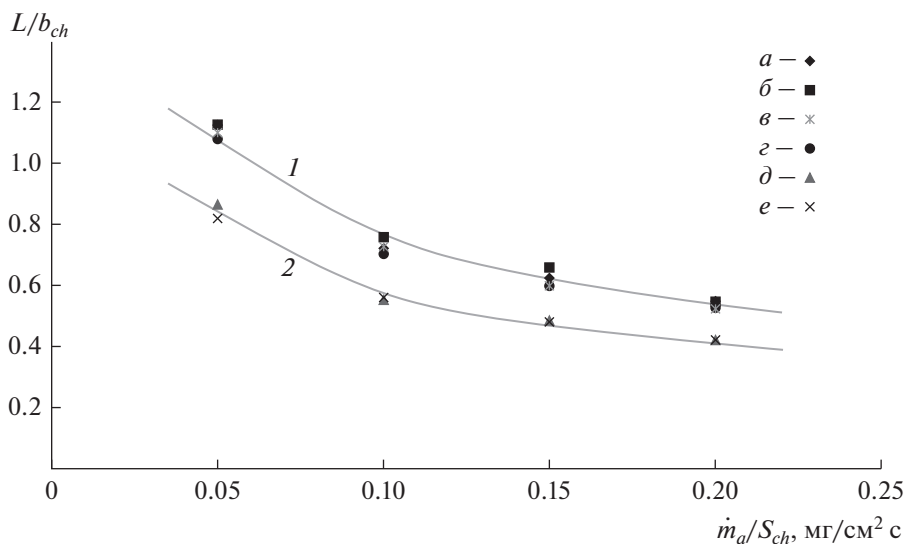
$$L/b_{ch} \approx C/\sqrt{\dot{m}_a/S_{ch}}, \quad (1)$$

где  $L$ ,  $b_{ch}$ ,  $S_{ch}$ ,  $\dot{m}_a$ ,  $C$  – соответственно, толщина СИУ, ширина и площадь поперечного сечения ускорительного канала, массовый расход через ускорительный канал и константа, зависящая от типа магнитной системы двигателя.

Из этой формулы следует, что при увеличении плотности расхода РВ в 2 раза можно уменьшить толщину СИУ примерно в 1.5 раза (рис. 1, [6]), т.е. достаточно значительно.

Следовательно, увеличивая расход и уменьшая толщину СИУ в совокупности с рассмотренными выше вынесением максимума распределения магнитной индукции и расширением канала за пределы плоскости полюсов, можно уложить весь СИУ и зоны эрозии стенок полностью в расширенной части ускорительного канала [3]. Это дает возможность увеличивать ресурс двигателя за счет увеличения запасов на износ стенок в свободном пространстве за пределами плоскости полюсов магнитной системы. Кроме того, предполагалось, что удастся добиться большего смещения СИУ из канала и обеспечить снижение общих потерь ионов и энергии на стенках канала, и что увеличение плотности расхода РВ позволит компенсировать негативное влияние снижения плотности расхода при расширении канала на вероятность ионизации атомов в слое и на степень переработки потока атомов в ионы (коэффициент использования РВ).

Таким образом, имеются предпосылки для создания достаточно эффективного СПД, способного длительно работать со значительно повышенной тягой по сравнению с существующими двигателями. И основной задачей данной работы являлось исследование реализуемости названных предпосылок.



**Рис. 1.** Зависимость относительной толщины СИУ от плотности расхода ксенона для разных двигателей и режимов их работы (1 и 2 – линии соответствуют зависимостям типа  $L/b_{ch} \approx C/\sqrt{\dot{m}_a/S_{ch}}$  (а – СПД-100/300В, б – СПД-140/300В, в – СПД-140/800В, г – СПД-100/800В; д – СПД-70/300В, е – СПД-50/180В).

## 2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ ДВИГАТЕЛЯ СПД-100ВТ

С учетом приведенных выше положений была модернизирована разработанная в НИИПМЭ МАИ лабораторная модель СПД-100ПМ [9] масштаба известного двигателя СПД-100 для обеспечения эффективной ее работы при повышенных мощностях разряда и получения тяги более 170 мН при использовании в современных двигателях СПД-100 и СПД-140 разрядном напряжении 300В и разрядной мощности 3 кВт без перегрева элементов ее конструкции. В результате исследования характеристик этой модели была подтверждена эффективность разработанного подхода к управлению процессами в двигателе, изложенными в разделе 1 данной статьи, и подтверждена возможность получения требуемой тяги без перегрева элементов конструкции двигателя. В частности, было показано, что на режимах работы с повышенной тягой в 2 раза тягой по сравнению с тягой серийного двигателя СПД-100 СИУ может быть полностью вынесен в расширенную за пределами полюсов магнитной системы выходную часть ускорительного канала [10]. При этом тяговый КПД ее составил более 60%, а среднемассовая скорость истечения РВ из него – более 18 км/с (удельный импульс тяги  $I_{sp}$  более 1800 с). Поэтому на основе названной модели были разработаны макетный и экспериментальный образцы двигателя СПД-100ВТ с основными размерами, близкими к разме-

рам двигателя СПД-100 (рис. 2). В названных образцах было реализовано следующее:

- Изменена конструкция магнитной системы по сравнению с исходным ее вариантом в модели СПД-100ПМ с тем, чтобы получалась достаточно высокая скорость нарастания индукции в выходном направлении и максимум распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности ускорительного канала был смещен за плоскость полюсов магнитной системы больше, чем в двигателе СПД-100 (рис. 2а).

- Сужен ускорительный канал в межполюсном зазоре с целью повышения плотности потока РВ в ускорительном канале, а выходная часть стенок ускорительного канала выполнена со стенками конической формы и расширением канала на угол 45° по каждой стенке, начиная от плоскости полюсов магнитной системы (рис. 2а). Такое расширение дает возможность сравнивать получающиеся скорости износа с полученными при ресурсных испытаниях двигателей СПД-100, когда при расширениях выходной части ускорительного канала около 45° на сторону были получены профили, близкие к коническим. Кроме того, ранее было показано [6], что при таком и больших расширениях не происходит смещения границ износа в направлении к аноду.

С учетом отмеченного можно было ожидать, что, если в двигателе СПД-100ВТ зоны износа будут локализованы в расширенной до 45° на сторону части канала, то они должны остаться в названной части канала и при дальнейшей его работе. Это позволяет рассчитывать на то, что ресурс

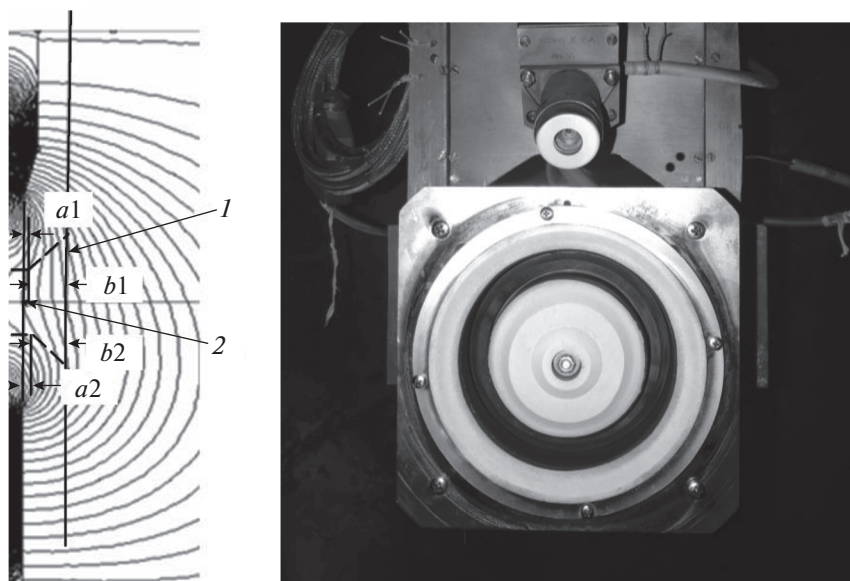


Рис. 2. (а) Картина силовых линий в макетном образце (1 – сечение с максимальной индукцией магнитного поля, 2 – плоскость наружного полюса,  $a_1 \geq 0$ ,  $a_2 \geq 0$ ) и (б) фото макетного образца двигателя СПД-100ВТ.

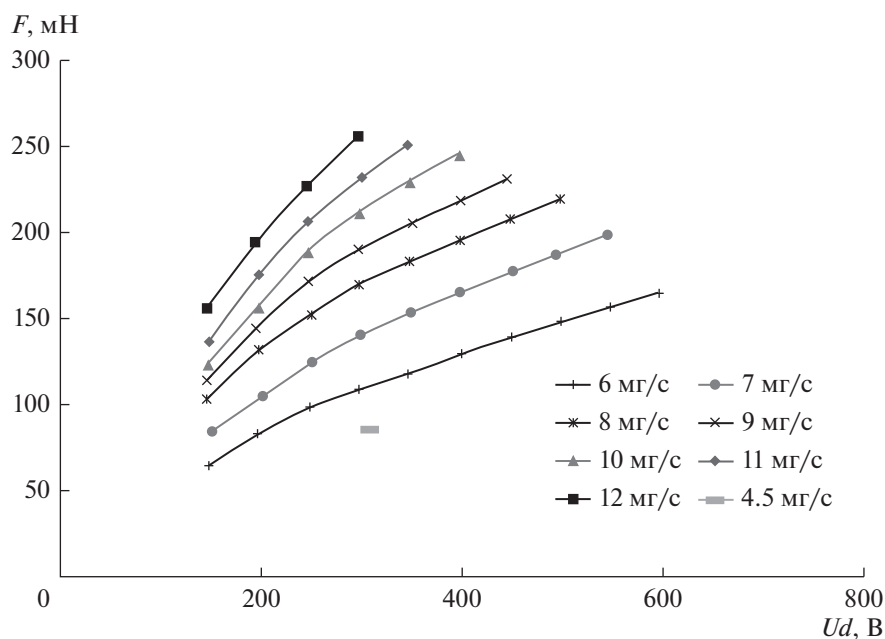


Рис. 3. Зависимость реактивной тяги от режима работы МО СПД-100ВТ.

двигателя можно увеличить за счет увеличения запасов на износ в свободном от полюсов пространстве.

Для подтверждения эффективности принятых решений были проведены экспериментальные исследования характеристик созданных образцов, а также проведены эрозионные испытания макетного образца (МО СПД-100ВТ) и экспериментального образца двигателя СПД-100ВТ (ЭО СПД-100ВТ).

Исследования интегральных характеристик МО СПД-100ВТ были проведены при расходах ксенона через анод в диапазоне (6–12) мг/с и разрядных напряжениях в диапазоне (150–600) В (рис. 3–5, где чертой без точек показаны параметры двигателя СПД-100 на номинальном режиме его работы с мощностью 1.35 кВт).

Как видно из приведенных данных, значения тяги более 170 мН могут быть получены при раз-

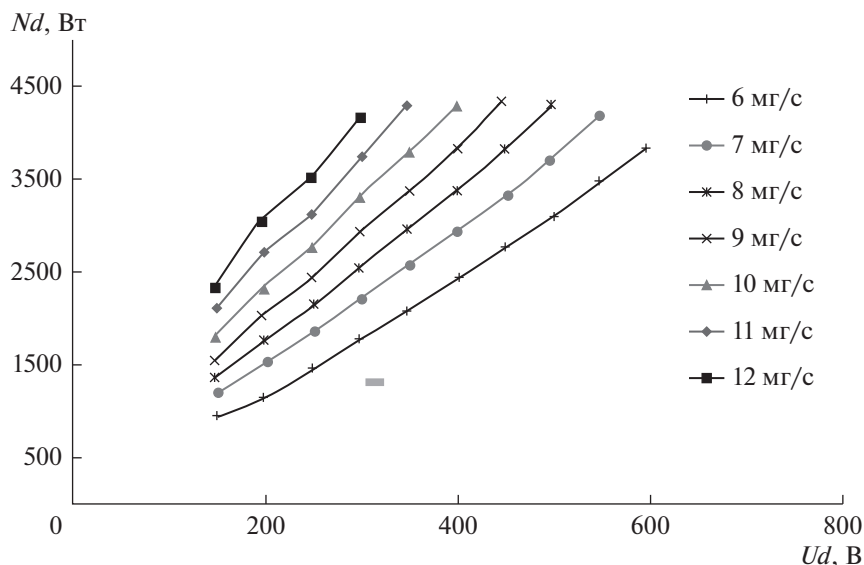


Рис. 4. Зависимость разрядной мощности от режима работы МО СПД-100ВТ.

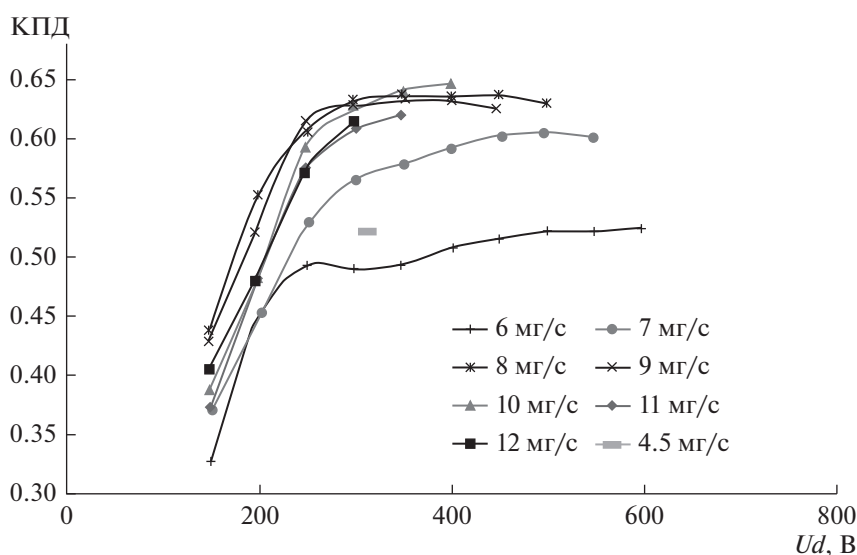


Рис. 5. Зависимость тягового коэффициента полезного действия (КПД) МО СПД-100ВТ от разрядного напряжения.

рядном напряжении 300 В и расходах ксенона через ускорительный канал (анод) 8.0 и более мг/с (рис. 3). При этом разрядная мощность составляет более 2.5 кВт (рис. 4), значения тягового КПД превышают 60% (рис. 5), а значения удельного импульса тяги – 1900 с (рис. 6). Таким образом, была подтверждена высокая тяговая эффективность МО СПД-100ВТ на режимах работы с тягой, не менее, чем вдвое превышающей тягу двигателя СПД-100. С учетом этого был выбран режим работы МО СПД-100ВТ с разрядным напряжением 300 В и расходом ксенона через анод 9 мг/с, при котором разрядная мощность составила около 3 кВт.

Были проведены также 60-часовые эрозионные испытания МО СПД-100ВТ на выбранном режиме, которые подтвердили высокий уровень тягового КПД и удельного импульса тяги, а также стабильность параметров МО СПД-100ВТ при его длительной работе (рис. 7–10).

Эти испытания проводились циклами с длительностью включений 3–4 ч, достаточной для установления стационарного теплового состояния конструкции МО СПД-100ВТ. Они подтвердили возможность работы макета с мощностью разряда (3.0–3.1) кВт (рис. 7) и тягой не менее 180 мН без видимого перегрева элементов конструкции (рис. 8).

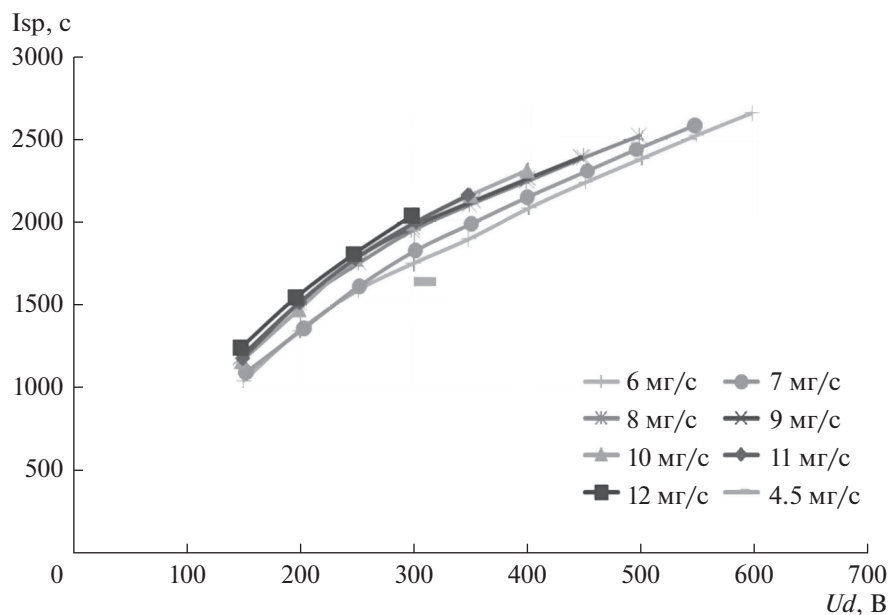


Рис. 6. Зависимости полного удельного импульса тяги  $I_{sp}$  МО СПД-100ВТ от режима его работы.

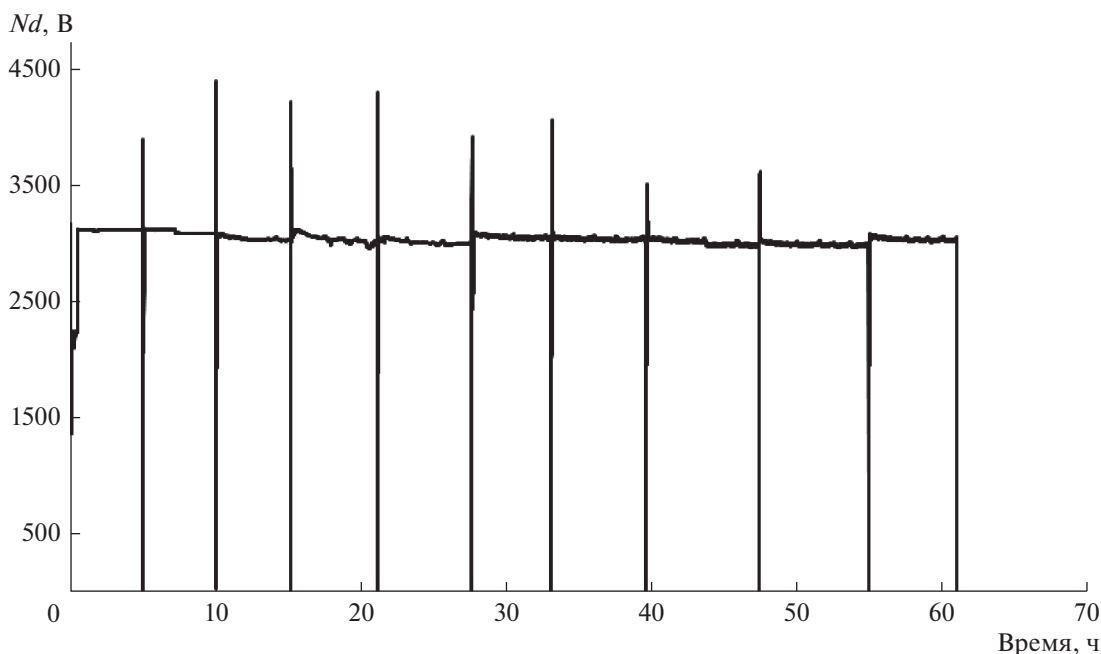


Рис. 7. Изменение разрядной мощности в процессе эрозионных испытаний макета СПД-100ВТ.

При этом удельный импульс тяги во время испытаний составлял не менее 1900 с (рис. 9), т.е. примерно на (10–15)% выше, чем у серийного СПД-100. Тяговый коэффициент полезного действия (КПД) был на уровне (60–65)% (рис. 10), что также на 5–7% выше, чем у серийного СПД-100.

До и после эрозионных испытаний были проведены измерения профилей стенок, ограничива-

ющих выходную часть ускорительного канала. В результате, было получено, что зоны эрозии расположены за пределами плоскости полюсов магнитной системы и полностью укладываются на расширенных участках стенок канала, а максимальная скорость эрозии, составила 11–13 мкм/ч, что выше полученных в двигателе СПД-100 при аналогичной геометрии выходной части ускор-

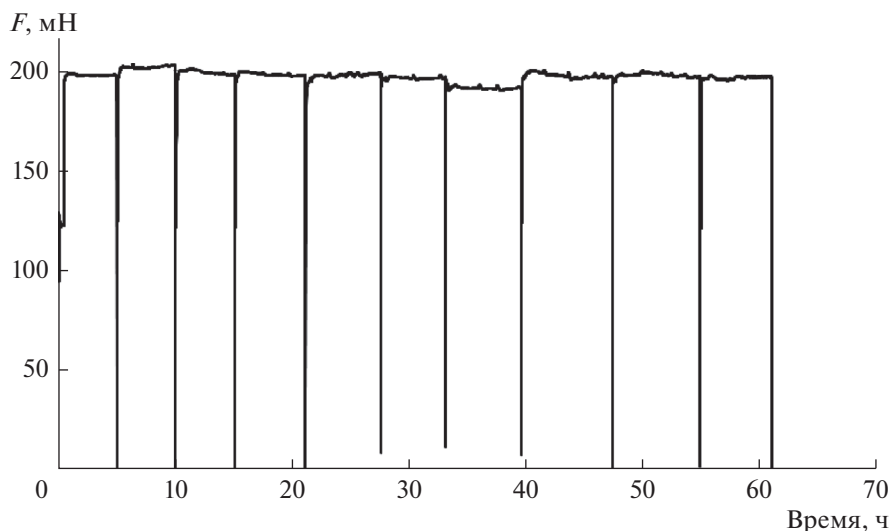


Рис. 8. Изменение тяги в процессе эрозионных испытаний макета СПД-100ВТ.

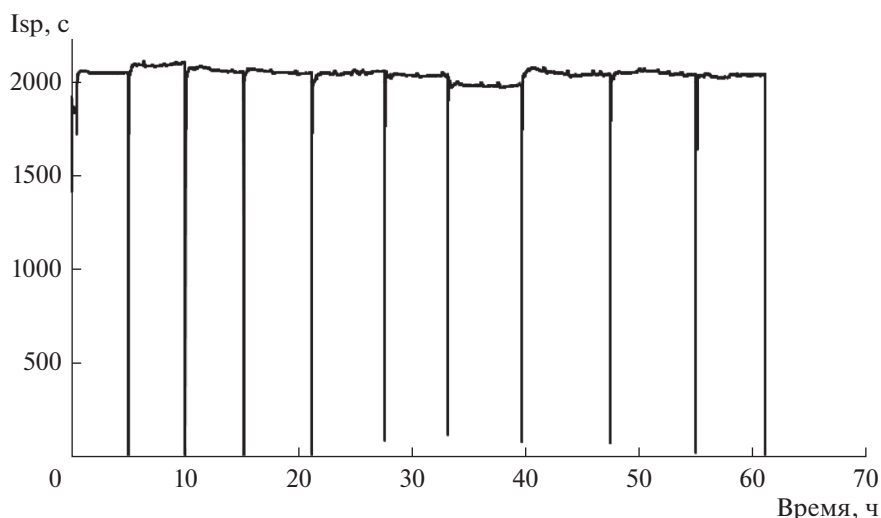


Рис. 9. Изменение удельного импульса тяги макета СПД-100ВТ в процессе эрозионных испытаний.

тельного канала. Однако повышенную скорость износа можно объяснить тем, что конические поверхности стенок были получены их механической обработкой, после которой нарушается структура поверхностного слоя. Поэтому для выхода на установившиеся значения скорости износа необходима приработка стенок канала. Согласно известным данным после приработки скорость износа снижается, как минимум, в 2–3 раза [11]. Поэтому можно было ожидать, что она выйдет на уровень порядка 4–5 мкм/ч, близкий к скорости износа стенок в двигателях СПД-100 при ресурсных их испытаниях и сопоставимых конфигурациях ускорительного канала [7].

На основе полученных результатов был разработан, изготовлен и испытан экспериментальный

образец ЭО СПД-100ВТ. Так же, как и для МО СПД-100ВТ было проведено исследование его характеристик и проведены 150-часовые его эрозионные испытания. При этом на первом этапе этих испытаний длительностью около 80 ч он работал на режиме работы с повышенными тягой и мощностью около 3 кВт, а на втором этапе последующие 70 ч были проведены на нескольких режимах работы с пониженными вплоть до 1.35 кВт мощностями с целью оценки влияния изменения режима работы на положение зон эрозии в ускорительном канале. Полученные результаты также подтвердили эффективную работу ЭО СПД-100ВТ на режиме работы с тягой более 180 мН и приведенный выше уровень скоростей износа “све-

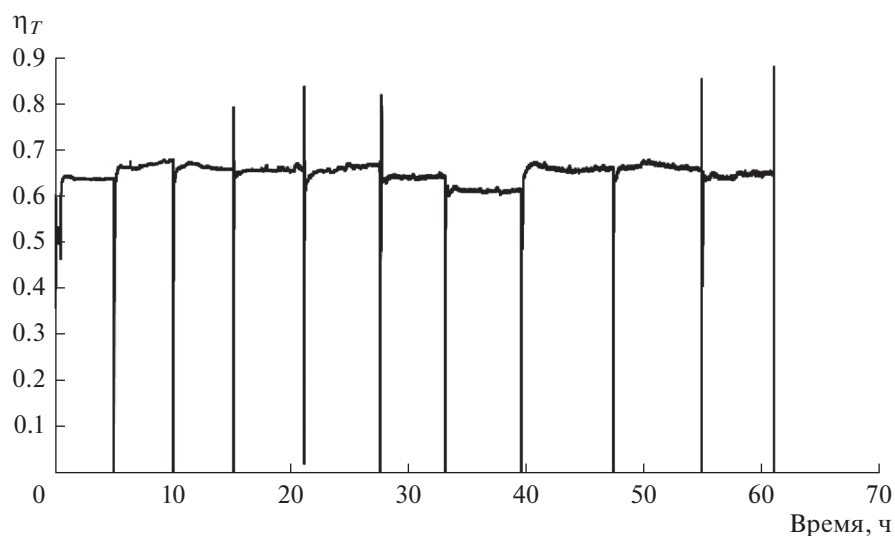


Рис. 10. Изменение тягового КПД макета СПД-100ВТ в процессе эрозионных испытаний.

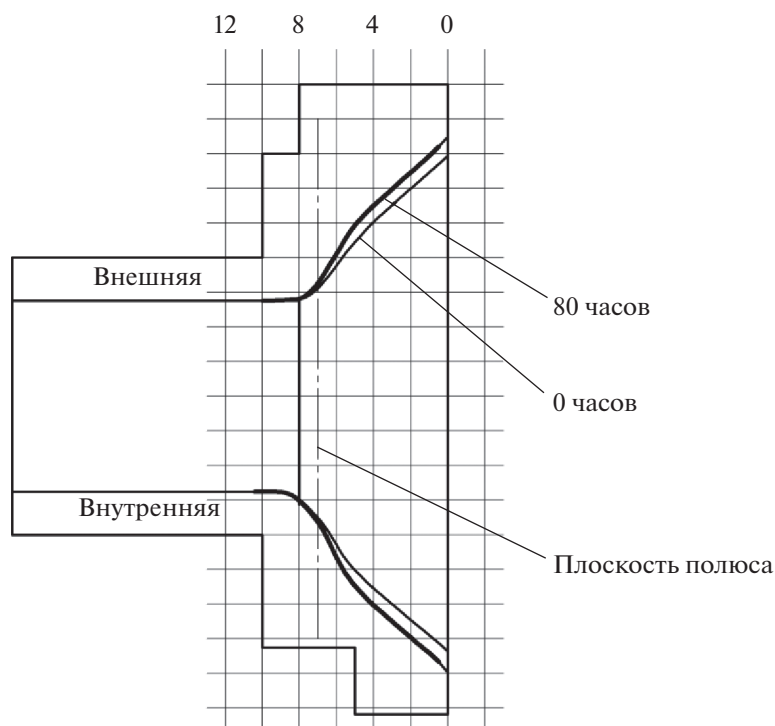


Рис. 11. Геометрия выходной части ускорительного канала до и после 1-го этапа эрозионных испытаний ЭО СПД-100ВТ.

жих” стенок в макетном образце после их механической обработки (рис. 11).

Измерения температуры наружного полюса и фланца магнитной системы показали, что на этом режиме работы они не превышают, соответственно, 280 и 250°С. Эти температуры близки к реализующимся в двигателе СПД-100 при длительной работе. Таким образом, было подтверждено, что при работе ЭО СПД-100ВТ на режиме с мощно-

стью около 3 кВт не происходит перегрева элементов его конструкции. Это свидетельствует об относительном (отнесенном к величине плотности потока атомов ксенона через ускорительный канал) уменьшении плотности потоков ускоренных ионов на стенки и соответствующего выделения энергии на них, что косвенно подтверждается и повышением тягового КПД МО СПД-100ВТ и ЭО СПД-100ВТ.



На втором этапе эрозионных испытаний ЭО СПД-100ВТ средняя мощность составила около 2.3 кВт, а приведенная к мощности 3 кВт скорость износа в результате приработки стенок составила, как и ожидалось после приработки, до значений меньше 4 мкм/ч. Эти значения скорости износа, как и ожидалось, не превышают скорости, полученные при ресурсных испытаниях двигателя СПД-100 при сопоставимых геометриях стенок выходной части разрядной камеры, несмотря на большую мощность разряда. Если учесть, что двигатель СПД-100 имеет ресурс не менее 7000 ч, то полученные данные свидетельствуют о возможности получения большого ресурса и двигателя СПД-100ВТ при его работе на режимах с вдвое большей тягой по сравнению с тягой двигателя СПД-100.

Важно также то, что зоны эрозии на втором этапе испытаний остались в пределах расширенной части ускорительного канала. Это подтверждает возможность увеличения запасов на износ выходных частей стенок разрядной камеры в радиальном направлении для увеличения их ресурса.

Таким образом, принятыми мерами были созданы условия для получения высокого уровня тяговых характеристик и большого ресурса двигателя СПД-100ВТ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате выполненной работы разработаны технические решения, обеспечивающие возможность эффективной работы двигателя СПД-100ВТ масштаба серийного двигателя СПД-100 на режиме с мощностью и тягой, превышающими номинальную мощность и тягу двигателя СПД-100 более, чем в 2 раза. При этом получают значения тягового КПД и удельного импульса тяги на таком режиме работы, превышающие соответствующие значения названных параметров двигателя СПД-100. Показано также, что принятыми решениями созданы условия для обеспечения приемлемого теплового режима элементов конструкции и большого ресурса двигателя СПД-100ВТ на режиме работы с повышенной вдвое тягой.

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте прикладной механики и электродинамики МАИ при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0231 (уникальный идентификатор ПНИЭР – RFMEF157716X0231) и

совместно с ОКБ “Факел” в качестве промышленного партнера МАИ в названном проекте.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козубский К.Н., Мурашко В.М., Рылов Ю.П. и др. СПД работают в космосе // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 3. С. 277–292.
2. Dan Lev, Roger M. Myers, Kristina M. Lemmer et al. The 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. 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. 486.
4. Ким В.П. Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова // Журн. технической физики. 2015. Т. 85. № 3. С. 45.
5. Mitrofanova O.A., Gnizdor R.Yu. Influence of SPT magnetic field on life time characteristics of the thruster // Paper IEPC-2013-51. Proceedings of the 33rd International Electric Propulsion Conference. October 6–10, 2013. The George Washington University, Washington, D.C. USA.
6. Ким В.П., Гниздор Р.Ю., Грдличко Д.П. и др. Основные положения, используемые для управления слоем ионизации и ускорения в разряде стационарного плазменного двигателя // Поверхность, Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2018. № 12. С. 101.
7. Arhipov B.A., Bober A.S., Gnizdor R.Y. et al. THE RESULTS OF 7000-HOUR SPT-100 LIFE TESTING // Paper IEPC-1995-039. 24th International Electric Propulsion Conference, Sept, 1995. Moscow, Russia.
8. Гришин С.Д., Ерофеев В.С., Жаринов А.В. Плазменные ускорители / Под ред. Л.А. Арцимовича. М: Машиностроение, 1973. С. 54–61.
9. Ким В.П., Грдличко Д.П., Меркурьев Д.В. и др. Исследование характеристик стационарного плазменного двигателя на режимах работы с высокими разрядными напряжениями // Вестник МАИ. 2015. Т. 22. № 4. С. 53.
10. Ким В.П., Гниздор Р.Ю., Грдличко Д.П. и др. Исследование возможности вынесения слоя ионизации и ускорения за пределы плоскости полюсов магнитной системы стационарного плазменного двигателя Морозова // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 23. С. 129.
11. Kim V., Abgaryan V., Kozlov V. et al. Development of the accelerated test procedure for the SPT discharge chamber wall wearing during long thruster operation // Paper AIAA-2003-5003. 39th Joint Propulsion Conference, 20–23 July, 2003. Huntsville, Al., USA.