

УДК 621.455.32

## Форсирование СПД-100 по тяге

Р.Ю. Гниздор, А.Н. Нестеренко, О.А. Митрофанова

### Аннотация

Представлены результаты исследований параметров модернизированной модели двигателя СПД-100 в области низких разрядных напряжений. Определена область рабочих параметров данного двигателя для решения задач довыведения КА на целевые орбиты.

### Ключевые слова

электроракетный двигатель (ЭРД); стационарный плазменный двигатель (СПД); космический аппарат (КА); тяга; удельный импульс тяги.

### Введение

Самый мощный российский ракетоноситель «Протон-М» с разгонным блоком «Бриз-М» способен выводить на геостационарную орбиту (ГСО) полезную нагрузку массой около 3 тонн. В настоящее время наблюдается тенденция по увеличению числа транспондеров на телекоммуникационных космических аппаратах (КА), а, следовательно, их бортовой мощности и массы. Участились так называемые кластерные запуски, когда одновременно выводится несколько КА, суммарная масса которых приближается к предельной грузоподъемности ракетоносителя.

Для увеличения массы полезной нагрузки представляется целесообразным применение комбинированной схемы выведения с использованием не только жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), но и электрических ракетных двигателей (ЭРД), удельных импульс тяги которых может находиться в диапазоне от 1000 до 3000 с (у ЖРД разгонных блоков ~ 350 с). Применение на заключительных стадиях выведения эффективных ЭРД позволит увеличить массу полезной нагрузки примерно в 1,5 раза.

К этому есть объективные предпосылки. Бортовая мощность современных КА достигает 10...20 кВт, и большая часть этой мощности на период выполнения транспортной операции может быть предоставлена ЭРД. Перелет будет выполняться двигателями,

сориентированными по направлениям «восток – запад», которые на ГСО имеют малую наработку в сравнении с двигателями коррекции, работающими в направлении «север - юг».

ЭРД являются многорежимными двигателям, которые при постоянной мощности могут функционировать как в режиме высокого удельного импульса тяги (при повышенном ускоряющем напряжении), так и в режиме форсированной тяги (при низком ускоряющем напряжении). Длительной фазы перелета с ЭРД зависит от тяговоруженности КА. Так для ухода из радиационных поясов Земли предпочтителен двигатель, форсированный по тяге. При этом естественно снизится удельный импульс тяги двигателя (в сравнении с высоковольтным режимом), но он будет в несколько раз выше, чем у традиционных ЖРД, что и обеспечит положительный результат.

Уже имеется опыт применения ЭРД различных типов для довыведения на ГСО и выполнения транспортных операций. Например, КА Artemis (ЕКА) с начальной массой 3100 кг и бортовой мощностью 4 кВт, из-за аварии верхней ступени РН Ariane-5 оказавшийся на 5000 км ниже ГСО, был выведен на расчетную орбиту с помощью ионного двигателя RIT-10 мощностью 0,5 кВт и тягой 18 мН. Время операции довыведения составило 18 месяцев.

КА SMART-1 (ЕКА) массой 367 кг и бортовой мощностью 1,9 кВт, выведенный на геопереходную орбиту с перигеем 750 км, с помощью стационарного плазменного двигателя (СПД) PPS-1350 мощностью 1,5 кВт и тягой 88 мН за 1,5 года совершил перелет на Луну. В сумме двигатель отработал 5000 ч.

КА АЕНФ-1 (США) с начальной массой 6168 кг из-за отказа ЖРД был довыведен на ГСО с помощью СПД ВРТ-4000 (мощность двигателя около 4,5 кВт и тяга 270 мН) в течение 14 месяцев.

Широкое применение в настоящее время имеет стационарный плазменный двигатель СПД-100В, работающий при разрядном напряжении 300 В при мощности 1350 Вт. Его номинальная тяга составляет 83 мН. Запуск первого космического аппарата с такими двигателями состоялся в 1994 году. С 1995 года эти двигатели успешно используется в системах коррекции серии российских геостационарных КА типа «Галс», «Экспресс», «Экспресс-А», «Экспресс АМ», «Sesat» и др. С 2003 года двигатель СПД-100 (СПД-100В) применяется и на зарубежных геостационарных КА типа «Inmarsat», «Intelsat-X», «IPSTAR-II», «Telstar-8» и других для решения задач приведения КА в «рабочую точку» на ГСО, стабилизации положения в ней и увода КА на орбиту «захоронения» по окончании эксплуатации.

В настоящее время в ОКБ «Факел» проводятся работы по модернизации двигателя СПД-100В, направленные на повышение его тяговых, удельных и ресурсных характеристик. Разработано несколько опытных моделей различного назначения. Модернизированный двигатель по сравнению с СПД-100В обеспечивает повышение интегральных параметров на 6 - 8 %. Его прогнозируемый ресурс составляет не менее 10000 часов при количестве включений не менее 14000 [1].

Такого типа двигатель может быть использован для довыведения относительно легких КА. Длительность транспортной операции существенно сократится при форсировании двигателя по тяге за счет увеличения мощности и выбора новой рабочей точки с пониженной энергетической «ценой тяги», то есть перехода на низковольтные режимы работы. Эта область работы двигателя остается малоисследованной и имеет свою специфику в части организации рабочего процесса. Поэтому представляет интерес для исследований.

### Конструктивные особенности модели, использованной при исследованиях

Форсированный по тяге двигатель отличается от СПД-100В, прежде всего, конструкцией магнитной системы, разработка которой проводилась с учетом современных представлений об оптимальности параметров и конфигурации магнитного поля. Основными требованиями при разработке являлись создание более фокусирующей конфигурации магнитной линзы с повышенным градиентом магнитного поля и обеспечение большего выноса положения максимума магнитной индукции за срез ускорительного канала.

На рисунке 1 показано распределение радиальной составляющей магнитного поля для СПД-100В и модернизированного двигателя. Такая конфигурация магнитного поля создала предпосылки для обеспечения необходимой фокусировки ионов при минимальных их потерях на стенках разрядной камеры, что привело к повышению тяговых, удельных и ресурсных характеристик двигателя.

Магнитная система двигателя имеет резервы, позволяющие обеспечивать работу на мощности разряда до 2 кВт при токе разряда до 8 А без магнитного насыщения в ее элементах.

С целью повышения

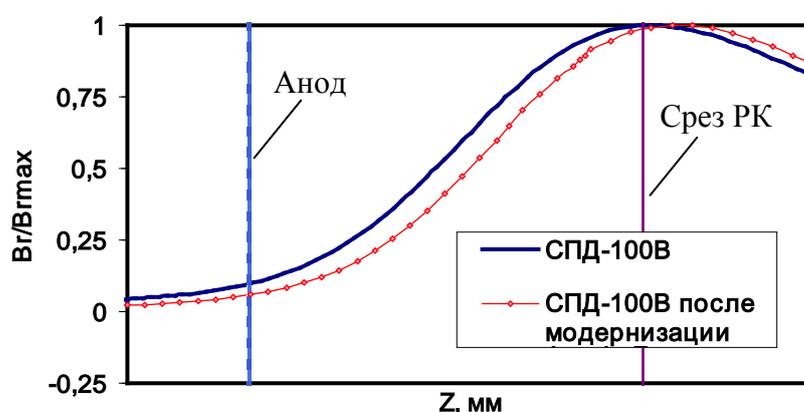


Рис.1. Распределение магнитного поля по средней линии канала разрядной камеры

ресурса разрядной камеры двигателя в исследуемой модели в качестве материала разрядной камеры используется материал, эрозионная стойкость которого, по меньшей мере, в 1,3 раза выше, чем у БПП-10, применяемого в настоящее время в СПД-100В.

### **Исследование интегральных параметров**

Работы по определению тяговых, удельных и ресурсных параметров исследуемого двигателя проводились на стенде, оборудованном криогенной системой откачки. Давление в вакуумной камере при суммарном расходе в двигатель 7,0 мг/с не превышало  $1.4 \times 10^{-4}$  мм. рт. ст. (по воздуху). Тяга двигателя и расход ксенона в анод двигателя измерялись с погрешностью не более 2.5 %. Перед началом испытаний измерители тяги и расхода дополнительно калибровались.

Исследования включали снятие вольтамперных характеристик (ВАХ) и определение параметров двигателя при фиксированных значениях мощности разряда.

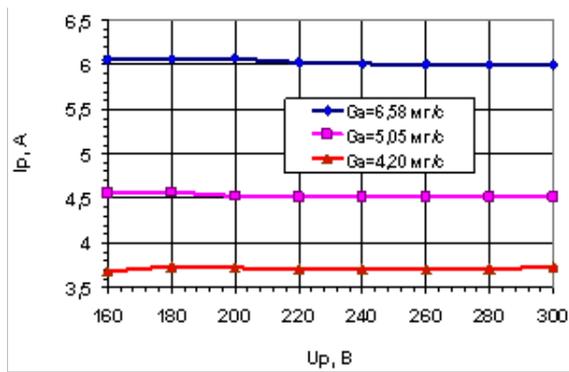
Вольтамперные характеристики снимались при постоянных значениях расхода в анод в диапазоне напряжений разряда от 160 до 300 В с шагом в 20 В. В каждом режиме выполнялась операция оптимизации токов в катушках магнитной системы по минимуму тока разряда или максимуму тяги.

Полученные интегральные параметры двигателя в исследованной области приведены на рисунке 2. На рисунке 2а) показаны ВАХ двигателя, на рисунке 2б) – результаты измерения ионного тока ( $I_i$ ). По известному ионному и разрядному ( $I_p$ ) токам был рассчитан сквозной электронный ток ( $I_e$ ) через разрядный канал (Рисунок 2в)). Стабильная величина ионного тока указывает на достаточно полную ионизацию ксенона. Рост электронного тока связан с тем, что при уменьшении разрядного тока (при  $I_i = \text{const}$ ) в разрядном канале из-за снижения скорости истечения ионов возрастает концентрация плазмы. Поэтому на низковольтных режимах наблюдается рост разрядного тока.

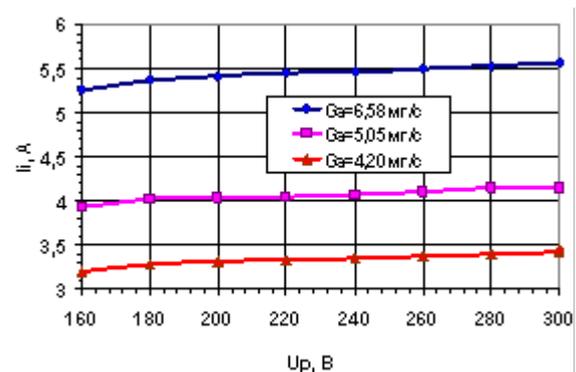
Рассчитанные по результатам испытаний по снятию вольтамперных характеристик зависимости цены тяги и анодного КПД двигателя от разрядного напряжения и величины анодного расхода, по которым удобно выполнять сравнение параметров двигателя при его работе в различных режимах, приведены соответственно на рисунках 2г) и 2д). Зависимость анодного удельного импульса от разрядного напряжения и величины анодного расхода показана на рисунке 2е).

Как можно видеть из представленных на рисунках результатов, в исследованном диапазоне цена тяги, анодный КПД и анодный удельный импульс слабо зависят от расходов в анод. Минимальные значения цены тяги находятся в области разрядных напряжений

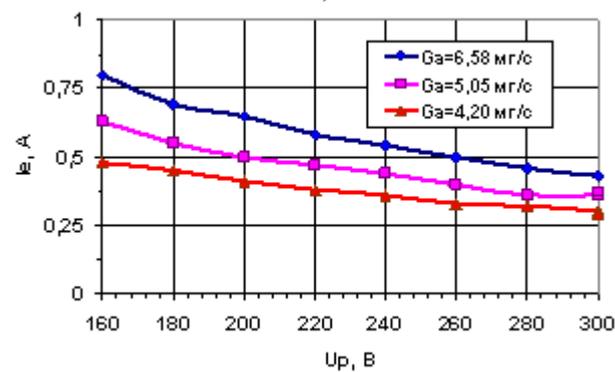
160...180 В. Таким образом, при этих разрядных напряжениях реализуются максимальные значения тяги. С точки зрения эффективности использования двигателя более предпочтительно использовать режимы с напряжением разряда в диапазоне (190-210)В, для которых анодный КПД составляет 48-52 %, и при которых реализуются одновременно и близкие к минимальным значения цены тяги (разница в цене тяги при напряжении 160 и 200 В не превышает 0.3 Вт/мН).



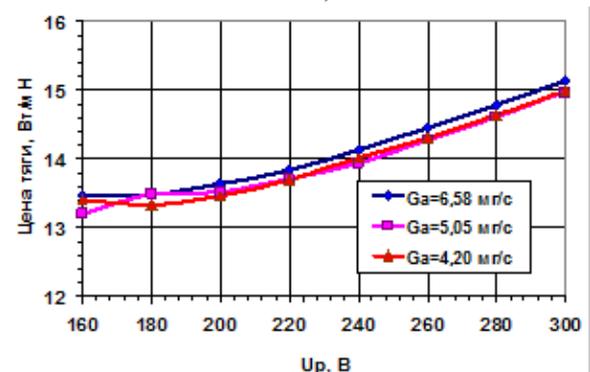
а)



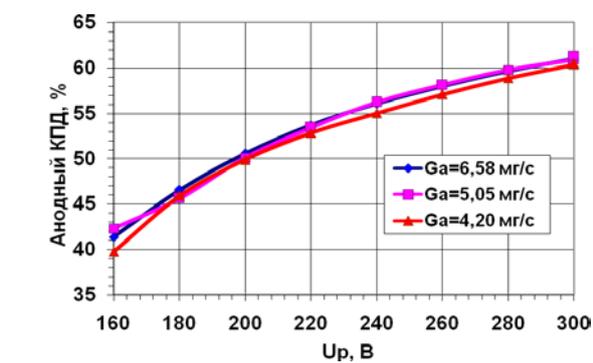
б)



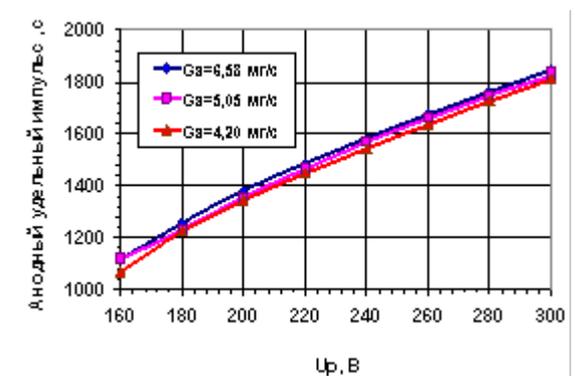
в)



г)



д)

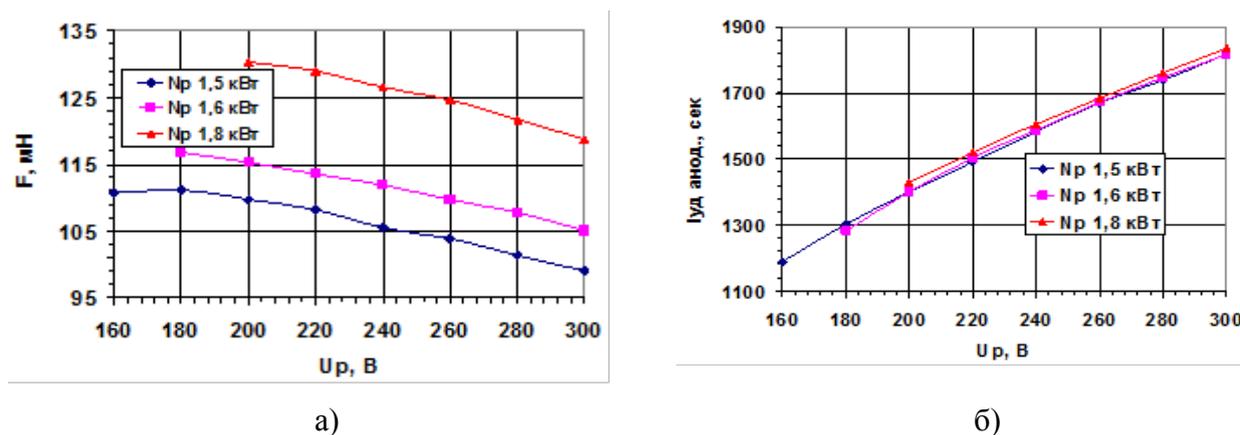


е)

а) – ВАХ, б) – ионный ток двигателя, в) – электронный ток, г) – энергетическая цена тяги, д) – анодный к.п.д., е) – анодный удельный импульс тяги

**Рис.2. Зависимости интегральных характеристик двигателя от разрядного напряжения и расхода ксенона**

В этом же диапазоне напряжений разряда от 160 до 300 В определялись также зависимости параметров двигателя при трех фиксированных значениях мощности разряда: 1,5, 1,6 и 1,8 кВт. Шаг изменения напряжения разряда в каждом из испытаний так же составлял 20 В. В каждом режиме выполнялась операция оптимизации токов в катушках магнитной системы. Результаты данных исследований параметров представлены на рисунке 3. Необходимо отметить, что ни на одном из указанных режимов перегрева двигателя не наблюдалось.



**Рис. 3. Интегральные параметры двигателя при постоянной мощности разряда**

Полученные значения тяги при мощности разряда 1.5...1.8 кВт на рекомендуемых с точки зрения эффективности использования двигателя режимах 190...210 В находятся в диапазоне 110...130 мН, величина анодного удельного импульса составляет приблизительно 1400 с. Представленные на рисунке 3 результаты могут быть использованы для осуществления выбора рабочей точки с требуемыми параметрами и заданной мощностью разряда.

Для оценки ресурсных характеристик разрядной камеры была выполнена наработка в объеме 40 часов при напряжении разряда 200 В и ток разряда 8.0 А. Перед началом испытаний и после их окончания были выполнены измерения геометрических размеров на срезе канала разрядной камеры, по результатам которых выполнена оценка скорости эрозии изолятора.

Результаты измерения геометрических размеров канала разрядной камеры показали, что за время работы двигателя в течение 40 часов радиус наружной стенки на срезе канала разрядной камеры увеличился на 0.40 мм, а радиус внутренней стенки уменьшился на 0.24 мм. Расчетные значения скорости эрозии для внутренней и наружной стенок, соответственно, составили 0.006 мм/ч и 0.010 мм/ч.

Сравнение скоростей эрозии на срезе канала разрядной камеры для

модернизированного двигателя при его работе в режиме с напряжением разряда 200 В и токе разряда 8.0 А со скоростью эрозии двигателя СПД-100В при работе в режиме с напряжением разряда 300 В и токе разряда 4,5 А показали, что скорость эрозии модернизированного двигателя, по крайней мере, на 20% меньше скорости эрозии двигателя СПД-100В, у которого она в начальный период работы составляет 0.01 мм/ч для внутренней стенки и 0,012 мм/ч для наружной стенки [2].

Ресурсные характеристики двигателя СПД-100В подтверждены на нескольких образцах двигателей [3, 4, 5]. Наибольшая наработка СПД-100В по времени составляет 9066 часов. При этом выработанный суммарный импульс тяги составляет 2.67 кН×с.

С учетом того, что скорость эрозии модернизированного двигателя в режиме работы при напряжении разряда 200 В и токе разряда 8.0 А на 20 % меньше, можно полагать, что суммарный импульс тяги двигателя при работе в режимах с максимальной тягой составит не менее 3.50 кН×с.

### **Выводы**

Проведенные исследования показали, что двигатель типа СПД-100В может быть форсирован по тяге до 110...130 мН за счет повышения мощности и перехода на низковольтный режим работы. Такой двигатель может быть востребован для довыведения малых КА с ограниченной бортовой энергетикой.

### **Библиографический список**

1. O. A. Mitrofanova, R. Yu. Gnizdor, V. M. Murashko, A. I. Koryakin, A. N. Nesterenko New generation of SPT-100// IEPC-2011-041, 32<sup>nd</sup> International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11 – 15, 2011
2. Garner C.E., Brophy J.R., Polk J.E. and Pless C.. "Cyclic endurance test of a SPT-100 stationary plasma thruster". 3rd Russian-German Conference on Electric Propulsion Engines and their technical application, Stuttgart, Germany, July 19-23, 1994.
3. B. Arkhipov, A. Bober, R. Gnizdor, K. Kozubsky, A. Koryakin, N. Maslennikov, S. Pridannikov The Results of 7000 Hour SPT100 Life Testing// IEPC-95-039, 24th International Electric Propulsion Conference, Moscow, Russia, 1995.
4. M. Day, R. Gnizdor, K. Kozubsky, A. Koryakin, N. Maslennikov, S. Pridannikov SPT100 Life Test with Single Cathode up to Total Impulse Two Million Nsec// AIAA-98-3790, 34th Joint Propulsion Conference, Cleveland, 1998.
5. D. Manzella, et al. High Voltage SPT Operation// AIAA-2001-3774, 37th Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, Utah, 2001.

### **Информация об авторах**

ГНИЗДОР Роман Юрьевич, старший научный сотрудник ФГУП ОКБ «Факел».

Россия, 236001, г. Калининград, Московский проспект, 181;

тел.: +74012556479; e-mail: fakel@gazinter.net

НЕСТЕРЕНКО Александр Никитович, ведущий научный сотрудник ФГУП ОКБ «Факел».

Россия, 236001, г. Калининград, Московский проспект, 181;

тел.: +74012556693; e-mail: fakel@gazinter.net

МИТРОФАНОВА Ольга Александровна, инженер ФГУП ОКБ «Факел».

Россия, 236001, г. Калининград, Московский проспект, 181, аспирант Балтийского федерального университета имени И. Канта; 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, д.14;

тел.: +74012556936; e-mail: fakel@gazinter.net