



### Об авторе

Александр Алексеевич Меркулов – директор технопарка, Калининградский государственный технический университет.

E-mail: alexandr.merkulov@klgtu.ru

### About the author

Aleksandr Merkulov – Head of Technopark, Kaliningrad State Technical University.

E-mail: alexandr.merkulov@klgtu.ru

80

УДК 629.7.036.74

*П. А. Саевец, А. В. Румянцев*

## РАЗРАБОТКА ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РАБОТЫ НА КРИПТОНЕ

*Применительно к таким миссиям, как удержание аппарата на орбите, повышение орбиты спутника, очистка орбиты от мусора, транспортные операции, так и разработка эффективного двигателя для исследования далекого космоса, используются электроракетные двигатели в качестве неоспоримой альтернативы химическим двигателям. Тем не менее даже лучшие решения, предлагаемые технологией электрореактивной тяги, все еще требуют оптимизации, несмотря на более чем полувековую историю. В настоящее время ксенон – лучшее рабочее вещество для ионных и холловских двигателей, однако он очень дорог, поэтому более дешевые рабочие вещества выступают как альтернативные для перспективных электроракетных двигателей.*

*Addressing such space mission as station keeping at the orbit, satellite orbit rising, debris deorbiting, cargo transportation and development of thrusters for deep space missions, electric propulsion appears to be an undisputed alternative for the chemical thrusters. Also, even the best solutions provided by electric propulsion technology still require optimization despite its more than of half a century history. Currently xenon is the propellant of choice for ion and Hall effect thrusters, however xenon is very expensive, that's why different cheaper propellants appears as an alternative fuel for advanced electric propulsion thrusters.*

**Ключевые слова:** стационарный плазменный двигатель, криптон, ксенон, рабочее тело.

**Key words:** stationary plasma thruster, krypton, xenon, propellant.

В настоящее время для создания электрореактивной тяги с помощью стационарных плазменных двигателей (СПД) используется ксенон. Это обусловлено тем, что при работе на ксеноне двигатель имеет более высокие тяговые и удельные характеристики, чем при работе на



других инертных газах. Однако, несмотря на это преимущество, существует фактор, который может ограничивать его применение в СПД — это ограниченные объемы его производства и, как следствие, его дороговизна.

Ксенон и другие инертные газы — это побочный продукт производства азота и кислорода. Его содержание в атмосфере крайне мало (табл.), что делает экономически невыгодным строительство заводов для производства ксенона. Поэтому темпы производства этого продукта не растут с увеличением спроса, они полностью ограничены производством кислорода. К тому же эти факторы сильно влияют на стоимость ксенона и делают его значительно дороже альтернативных рабочих тел (РТ). Следует заметить, что на космических аппаратах (КА) с существующей конструкцией СПД замена РТ с ксенона, в частности, на криптон при выполнении одних и тех же задач не приведет к удешевлению миссии.

81

#### Содержание газов в воздухе

Вещество	Обозначение	По массе, %
Азот	N <sub>2</sub>	78,08400
Кислород	O <sub>2</sub>	20,94800
Аргон	Ar	0,934000
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	0,037000
Неон	Ne	0,001818
Гелий	He	0,000524
Криптон	Kr	0,000114
Водород	H <sub>2</sub>	0,000050
Ксенон	Xe	0,000009

Рост числа КА и создание многочисленных орбитальных группировок может привести к тому, что производимого сейчас ксенона станет недостаточно. Нельзя увеличить производство ксенона, но можно значительно уменьшить спрос на него. Наиболее перспективным в качестве альтернативы ксенону является криптон.

#### Сравнение ксенона и криптона в качестве РТ для СПД

Ксенон используется по ряду причин. Он имеет высокую атомную массу — 131 а. е. м. — и относительно низкий потенциал ионизации — 12,1 эВ. Кроме того, инертность ксенона устраняет проблемы с безопасностью применения, которые возникали при использовании ртути и цезия. Ксенон можно хранить при повышенных плотностях, что позволяет уменьшить объем бака.

Криптон видится перспективным РТ в миссиях, где требуется повышенное значение удельного импульса. Криптон имеет меньшую атомарную массу 83,8 а. е. м., но более высокий потенциал ионизации 14,0 эВ. Как и ксенон, криптон так же инертный газ, и он может использоваться в разработанных системах хранения и подачи РТ (СХПРТ) без их существенной модернизации. Большой потенциал ионизации



оказывает негативное влияние на КПД двигателя, но более низкая атомарная масса теоретически может увеличить удельный импульс на 25 %. Это можно использовать для удержания КА на геостационарной орбите, но при транспортных операциях значительно увеличит время перехода между орбитами.

Переход на криптон может быть выполнен только при обеспечении приемлемых тяговых параметров, поэтому совместно с НИИ ПМЭ МАИ было проведено исследование [1], которое показало, как меняются характеристики двигателя при переходе на криптон. Исследование проводилось на двигателе СПД-50М с модернизированной магнитной системой.

### Параметры СПД-50М при работе на ксеноне и криптоне

Проведенные параметрические испытания двигателя при работе в различных режимах на ксеноне и криптоне свидетельствуют о том, что при ограничении мощности разряда величиной порядка 200 Вт:

- наилучшие тяговые параметры фиксируются при работе на ксеноне при расходе через ускорительный канал  $\sim 1$  мг/с и повышенных до (250-300) В разрядных напряжениях;
- при работе двигателя на криптоне получаются значительно более низкие значения тяги, удельного импульса тяги и тягового КПД.

Вольтамперные характеристики (ВАХ) на ксеноне имеют традиционный характер, при работе на криптоне ВАХ более разнообразны (рис. 1), но в целом по сравнению с режимами работы на ксеноне для них характерен сдвиг начального участка возрастания разрядного тока в сторону более высоких напряжений и практически полное отсутствие участка с повышенными значениями разрядного тока. Это естественно, так как для ионизации криптона требуются более высокая энергия электронов, которая возрастает с увеличением разрядного напряжения. При этом названный сдвиг тем больше, чем меньше расход через ускорительный канал, что также объяснимо тем, что с уменьшением расхода снижается плотность плазмы в ускорительном канале и возрастает длина свободного пробега атомов до ионизации. Поэтому одна и та же степень переработки потока атомов в ионы достигается при более высокой температуре электронов, реализующейся при более высоком разрядном напряжении.

Зависимости анодного удельного импульса тяги, полученные для двигателя СПД-50М на ксеноне, свидетельствуют о том, что при постоянном напряжении с увеличением расхода ксенона через ускорительный канал более 1,45 мг/с происходит незначительное увеличение удельного импульса тяги (рис. 2). Это указывает на достаточность концентрации плазмы в указанном диапазоне для достижения высокой степени переработки потока атомов в ускорительном канале при высоких разрядных напряжениях. В то же время при работе двигателя на криптоне с увеличением его расхода вплоть до максимального его значения 1,77 мг/с происходит, хотя и не очень значительное, но монотонное возрастание и анодного удельного импульса тяги (рис. 2).

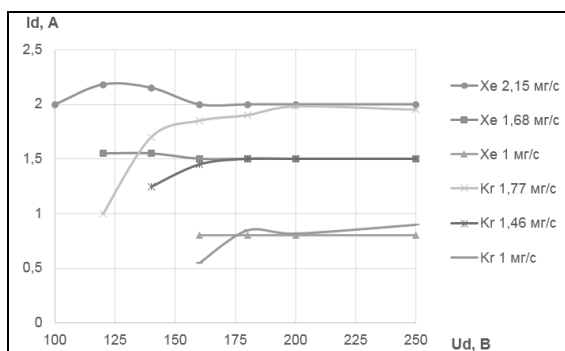


Рис. 1. Вольтамперные характеристики двигателя при работе на ксеноне или криптоне

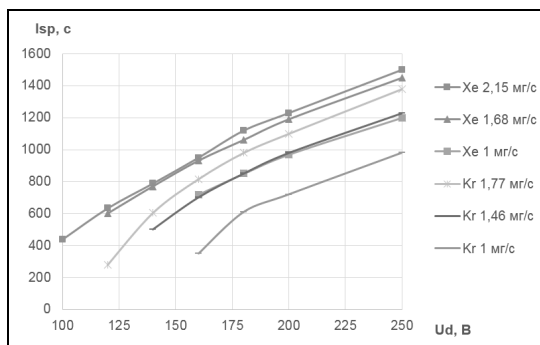


Рис. 2. Зависимость анодного удельного импульса тяги от разрядного напряжения при работе на ксеноне и криптоне

С учетом отмеченного можно предположить, что даже при работе двигателя на ксеноне при небольших расходах через ускорительный канал, а также и на криптоне, коэффициент переработки атомов в ионы на исследованных режимах работы был не высок. Возможные пути улучшения тяговых характеристик – повышение напряжения и увеличение массового расхода. Поэтому для проектируемого двигателя под низкий уровень мощности было решено уменьшить в 1,5 раза по сравнению с СПД-50М площадь поперечного сечения разрядной камеры, что позволило бы реализовать режим работы нового двигателя, соответствующему режиму работы СПД-50М с мощностью разряда 250 Вт и расходом криптона 1,5 мг/с. Для обеспечения требуемой площади поперечного сечения разрядного канала были подобраны его ширина – 8 мм, и наружный диаметр 40 мм.

### Разработка и параметрические испытания СПД-40

Под выбранные размеры разрядного канала была разработана конструктивная схема двигателя (рис. 3). Магнитная система двигателя включает в себя магнитные экраны (поз. 5 и поз. 6), магнитопровод и



три катушки намагничивания: центральная, наружная основная — катушка кольцевой конструкции, охватывающая разрядную камеру, и наружная вспомогательная (поз. 4, 7, 8). Наружная вспомогательная катушка внедрена в двигатель, опираясь на опыт использования анодной катушки в СПД-100. Вспомогательная катушка должна создать оптимальную конфигурацию магнитного поля в ускорительном канале и, тем самым, повысить эффективность работы двигателя. В конструкции предусмотрены съемные элементы, которые позволяют управлять топологией магнитного поля. К таким элементам относятся: внутренний полюс, крепящийся винтом к сердечнику центральной катушки; надставки магнитных экранов. Сменные надставки магнитных экранов позволяют изменять зазор между магнитными экранами и полюсами. Внешний вид лабораторной модели двигателя показан на рисунке 4.

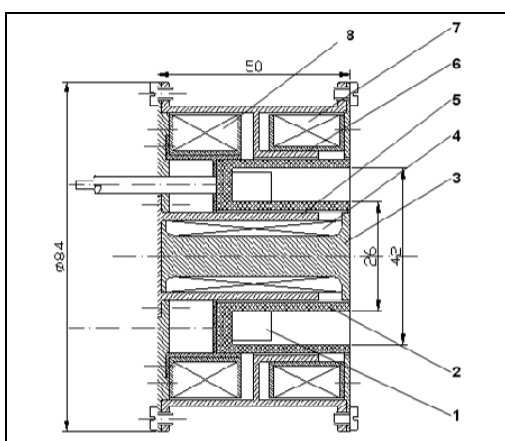


Рис. 3. Конструктивная схема двигателя СПД-40:  
1 — анод; 2 — разрядная камера; 3 — центральный сердечник;  
4 — внутренняя катушка намагничивания; 5, 6 — магнитные экраны;  
7 — основная наружная катушка намагничивания;  
8 — вспомогательная катушка намагничивания



Рис. 4. Внешний вид двигателя СПД-40



Для определения диапазона рабочих режимов СПД-40 и для выбора оптимального режима его работы были получены вольтамперные характеристики на криптоне при ограничении мощности разряда значением 250 Вт. Параметры работы двигателя измерялись в режимах работы при фиксированном значении тока разряда в точках 1,01А, 0,92А и 0,82А, соответствующих расходам 1,05 мг/с, 0,94 мг/с и 0,86 мг/с. В качестве номинального выбран режим работы с напряжением разряда 300 В и током 0,82 А, что соответствует суммарному расходу в 0,86 мг/с. В этом режиме тяга двигателя составила 10,1 мН (рис. 5), а удельный импульс тяги был равен 1212 с (рис. 6).

85

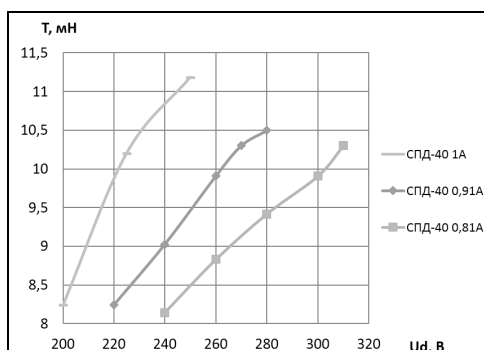


Рис. 5. Зависимость тяги СПД-40 от разрядного напряжения при работе на криптоне

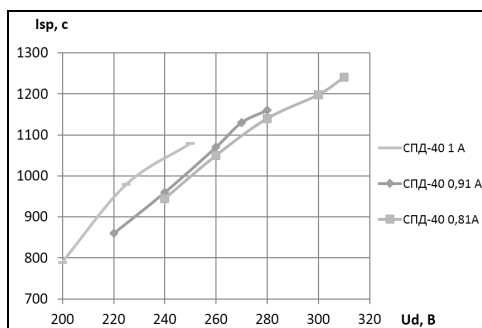


Рис. 6. Зависимость удельного импульса тяги СПД-40 от разрядного напряжения при работе на криптоне

### Ресурсные испытания СПД-40

Для выяснения вопроса, насколько стабильны параметры двигателя при длительной наработке, были проведены испытания длительностью 150 ч в номинальном режиме работы. В первые 18 ч наработки наблюдались значительные колебания параметров в пределах 150 с по удельному импульсу и 1 мН по тяге. Эти колебания могут быть обусловлены первичной приработкой двигателя после изготовления. После первых 18 ч произошла замена вышедшего из строя катода. В дальнейшем двигатель стабильно работал в заданном режиме.

После стабилизации параметров на уровне 1150 с и 9,9 мН при тяговом КПД 22,7 % началось относительно равномерное снижение параметров до 1043 с и 9,42 мН при КПД 19,4 %. Значительное снижение тяговых характеристик двигателя объясняется эрозией стенок выходной части разрядной камеры. Также увеличился и массовый расход с 0,87 до 0,92 мг/с. Одновременно с падением характеристик и КПД наблюдался рост температур на элементах двигателя.

По проведении ресурсных испытаний были осуществлены контрольно-параметрические испытания на ксеноне и криптоне, показавшие, что снижение параметров на других режимах имеют похожий характер. По окончании ресурсных испытаний были проведены измерения профиля износа РК. На рисунке 7 изображены профили наружной и внутренней стенок РК. Радиальная эрозия у наружной стенки составила 1,1 мм, ширина пояска – 3,5 мм. На внутренней стенке эрозия достигла кромки РК и углубилась на 0,3 мм, ширина пояска – 4,5 мм. Скорость износа может быть объяснена перекосом ускоряющего слоя на выбранном оптимальном режиме, поэтому главное внимание при совершенствовании конструкции модели СПД-40 следует уделить уменьшению потока ионов на поверхность внутренней стенки разрядной камеры.

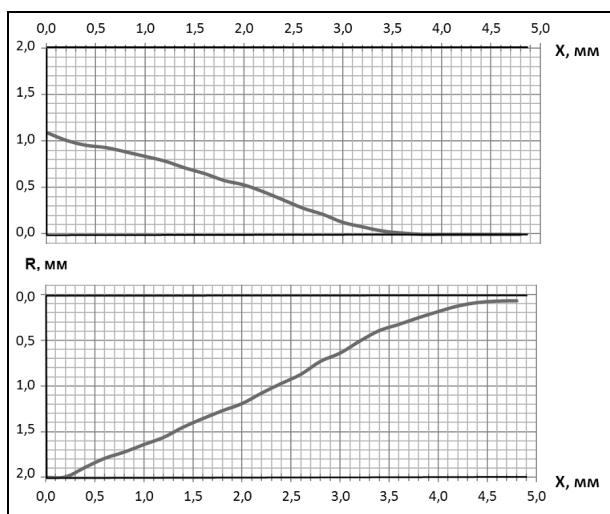


Рис. 7. Профили износа стенок РК СПД-40 после наработки 150 часов

## Выводы

Проведенные испытания подтвердили, что основным способом повышения удельного импульса тяги является повышение плотности расхода рабочего газа в ускорительном канале и что возможно получение полного удельного импульса тяги СПД не менее 1100 с при работе на криптоне с мощностями разряда не более 250 Вт. Вместе с тем ожидаемо проявились отрицательные эффекты уменьшения масштаба модели, сводящиеся к следующему:



— выявлена высокая скорость износа внутренней стенки разрядной камеры, ставящая под сомнение возможность обеспечения большого ресурса модели на режимах работы с высоким удельным импульсом тяги;

— получено значительное снижение удельного импульса тяги в процессе контрольной наработки длительностью 150 часов.

Как уже отмечалось, в двигателе предусмотрена возможность оптимизации геометрии магнитной системы при помощи насадок на магнитные экраны и сменного полюса. Дальнейшее усовершенствование включает сдвиг приосевой части слоя ионизации и ускорения в выходном направлении путем сдвига торца внутреннего магнитного экрана в этом направлении; подбор формы внутреннего магнитного полюса; увеличение запаса внутренней стенки РК на износ. Ожидаемыми положительными эффектами оптимизации будут уменьшение протяженности зоны износа на внутренней стенке и снижение скорости ее износа; повышение ресурса РК; уменьшение масштабов снижения удельного импульса тяги при длительной работе.

### Список литературы

1. Ким В. П., Меркурьев Д. В., Смирнов П. Г. Исследование характеристик двигателей СПД-50М и ПлаС 40 при их работе на смесях ксенона и криптона : технический отчет по НИР. М., 2015.

2. Белан Н. В., Ким В. П., Оранский А. И., Тихонов В. Б. Стационарные плазменные двигатели. Харьков, 1989.

3. Kim V., Popov G., Kozlov V. et al. Investigation of SPT performance and particularities of its operation with Kr and Kr/Xe mixtures // IEPC 2001-065, 27th International Electric Propulsion Conference. Pasadena, CA, 2001.

4. Kim V., Kozlov V., Semenov A., Shkarban I. Investigation of the Boron Nitride based Ceramics Sputtering Yield Under it's Bombardment by Xe and Kr ions // IEPC-01-073 in the Proceedings of the 27th International Electric Propulsion Conference. Pasadena, CA, 2001.

5. Kurzyina J., Barral S., Daniłko D., Miedzik J. First Tests of the KLIMT Thruster with Xenon Propellantat. The ESA Propulsion Laboratory.

### Об авторах

Павел Александрович Саевец — инженер-конструктор, ОКБ «Факел», асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: wolandxai@gmail.com

Альберт Владимирович Румянцев — канд. физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: albert37@list.ru

### About the authors

Pavel Saevets — design engineer, EDB Fakel, PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: wolandxai@gmail.com

Dr Albert Rumyantsev — PhD, professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: albert37@list.ru