

УДК 621.455.32

История космических стационарных плазменных двигателей и их применение в России, США и Европе. Новые вызовы для стационарных плазменных двигателей. К 40-летию первых космических испытаний стационарных плазменных двигателей

К.Н. Козубский, А.И. Корякин, В.М. Мурашко

Аннотация

Представлен обзор по истории создания и применения на российских и зарубежных космических аппаратах (КА) стационарных плазменных двигателей (СПД) – двигателей Морозова. Обзор охватывает события, включая первые космических испытаний СПД в составе КА «Метеор» и применение в составе российских и зарубежных КА до настоящего времени. Рассматриваются новые вызовы для СПД в XXI веке: высокие удельный импульс и ресурс, большие и малые мощности.

Ключевые слова

стационарный плазменный двигатель (СПД); космический аппарат (КА); электроракетные двигательные установки (ЭРДУ)

Введение. Начало Эры космических плазменных двигателей

В декабре 1964 года «впервые в космической технике для целей ориентации был успешно опробован плазменный движитель, что представляет большой интерес для межпланетных полетов». Эти слова С.П. Королева были заслуженной оценкой труда коллектива сотрудников ИАЭ имени И.В. Курчатова и ОКБ-1, создавших первую советскую систему ориентации КА типа «Зонд» с импульсными плазменными двигателями (ИПД). На встрече в г. Калуге, в Музее космонавтики в 40-летний юбилей работы ЭРД в космосе В. Храбровым и М. Казеевым была предложена хронология истории космических двигателей, в которой работа ИПД на КА «Зонд» рассматривалась как начало Эры космических электрореактивных двигателей. Дальнейшие работы по разработке ИПД из ИАЭ им. И.В.

Курчатовы были переданы в ОКБ «Факел». Первенец космической продукции Факела – импульсная двигательная установка «Глобус» (рисунок 1а) стартовала в 1968 году с космодрома Плесецк. А в 70-ые годы XX века блоки этой установки использовались в серии геофизических экспериментов по программе «Ариель» (МАИ, Г. Попов).

В 60-е годы развитие космонавтики и атомной энергетики способствовали появлению первых марсианских проектов с использованием кластеров литиевых ЭРД. Совместно с конструкторами космических КБ в ОКБ «Факел» был создан и проведены 470-часовые испытания лабораторного образца литиевого ЭРД мощностью 500 кВт при удельном импульсе 4000 с (рисунок 1б).



а)



б)

Рис.1. а) ИПДУ «Глобус», 1968 год; б) литиевый МПД, 500 кВт, 1974 год

ИПД почти полвека назад выполнили свою роль, проложив для ЭРД дорогу в космос. Состояние космической энергетики не позволило в те годы перейти к реализации проектов с ЭРД большой мощности. Поэтому СПД, которые продемонстрировали возможность работы при достигнутом уровне космической энергетики, оказались более пригодными для решения актуальных задач космической навигации по точной коррекции орбиты КА малой и средней энерговооруженности.

Хронология событий истории космических СПД

1964 год Начало ЭРЫ космических электрореактивных двигателей. ИПД на КА «Зонд». Марсианские проекты транспортных модулей с ЭРД.

1972 – 1980 годы СПД РАБОТАЮТ В КОСМОСЕ. Первые испытания СПД в космосе на КА «Метеор». ЭРДУ для коррекции орбит КА «Метеор» на околоземной орбите.

1981...2012 годы СПД на российских геостационарных телекоммуникационных КА. Применение СПД в системе стабилизации углового положения на КА «Плазма».

1991...2012 годы Открытие российских СПД Америкой. Квалификация СПД по международным стандартам. СПД на американских и европейских КА.

XXI век Новые вызовы: Транспортные энергетические модули. ЭРДУ для малых КА.

1971-1981 годы СПД - новое изделие космической техники.

Первые космические испытания СПД в составе КА «Метеор»

Идея создания СПД была предложена А. Морозовым в начале 60-х годов XX века. В 1968 году академиком А. Александровым и главным конструктором А. Иосифьяном было принято историческое решение о проведении испытаний для проверки работы в условиях космического пространства СПД – двигателей Морозова. Разработка первой двигательной установки с СПД и ее интеграция на КА «Метеор» была выполнена в тесном содружестве групп ученых и специалистов Курчатовского института (Г. Тилинин), ОКБ «Факел» (К. Козубский), ОКБ «Заря» (Л. Новоселов), ВНИИЭМ (Ю. Рылов). В декабре 1971 года корректирующая двигательная установка (КДУ) с СПД - «ЭОЛ» успешно стартовала в космос в составе КА «Метеор». 40 лет назад в феврале – июне 1972 года проведены первые включения и испытания, продемонстрировавшие работоспособность СПД в космосе и совместимость с КА на околоземных орбитах [1, 2]. На рисунке 2 приведены фотографии первых космических СПД.

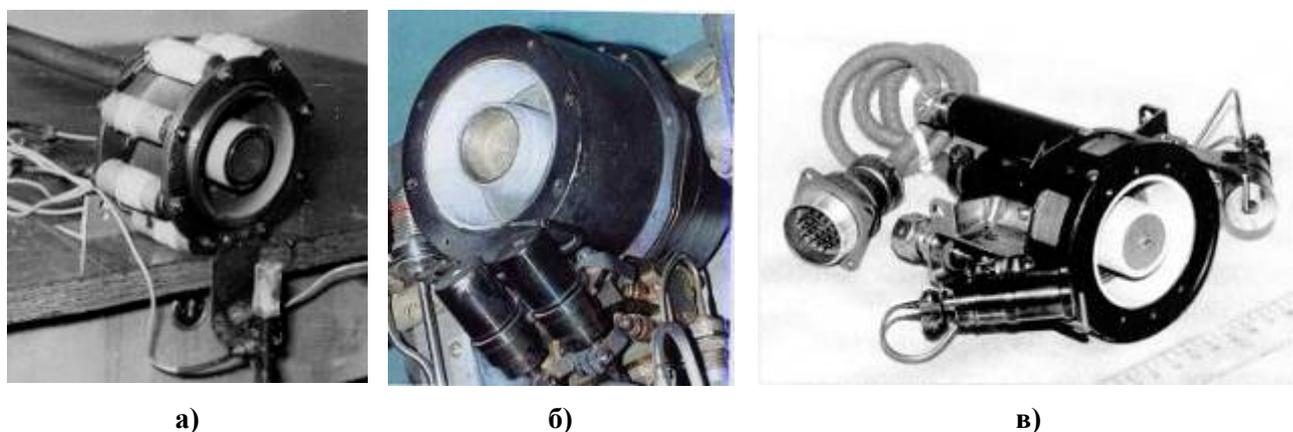


Рис.2. а) Первый макет СПД, ИАЭ, 1968 год; б) СПД-60, Факел, 1974 год; в) СПД-50, Факел, 1978 год

Итоги космических испытаний первых ЭРДУ с СПД /Что это было/

Создание новой российской технологии стационарных ЭРД на основе плазменных ускорителей в скрещенных электрическом и магнитном полях с замкнутым дрейфом электронов.

Опыт своевременного и четкого принятия решений, отвечающих на вопросы: что, где, когда и как, опыт эффективной совместной работы малых групп исследователей в области плазмы, разработчиков новых космических ЭРД, специалистов по их применению на КА и эксплуатации при космических полетах.

Результат труда, часть жизни (и предмет гордости) каждого из участников событий, связанных с созданием первых ЭРДУ с СПД, и надежды на дальнейшее сотрудничество в

продвижении технологии ЭРД в космос, на участие в международных проектах Золотого века ЭРД.

СПД начали работать в космосе

С 1974 года КДУ «ЭОЛ-2» и «ЭОЛ-3» (рисунок 3) использовались для выполнения космических маневров по установке КА «Метеор» на синхронно-солнечные орбиты и стабилизации положения КА на этих орбитах, а также для изменения эксцентриситета и фазового положения на орбите. Для астрофизического эксперимента «Поркупайн» был разработан источник плазмы на базе СПД-60 с прямым подключением к высоковольтной аккумуляторной батарее.

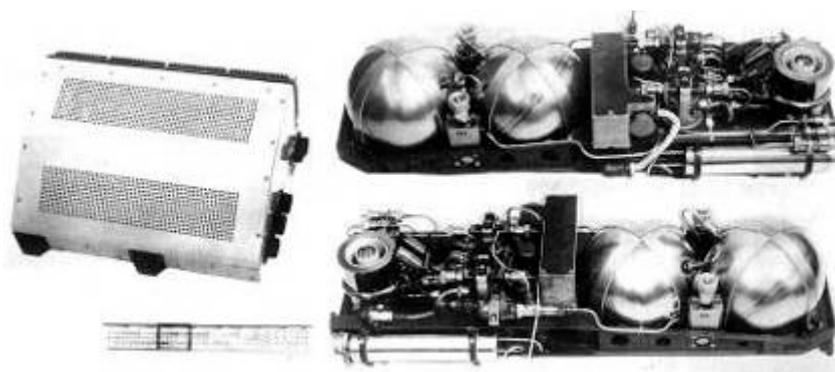


Рис.3. ЭРДУ «ЭОЛ-2», «ЭОЛ-3» для точной коррекции орбиты КА «Метеор», 1974...1980 годы

В результате первого этапа разработки ЭРДУ с СПД был осуществлен переход: от исследований плазменных ускорителей для термоядерного синтеза к СПД с ускорением потока ионизированного ксенона в электрическом и магнитных полях; от исследований низкотемпературной плазмы газового разряда в ионных приборах при постоянном давлении к СПД с газовым разрядом в потоке ксенона; от лабораторных моделей к летным образцам СПД, соответствующим стандартам ракетно-космической техники.

В первых конструкциях ЭРДУ с СПД были применены новые конструктивные и схемные решения, во многом определившие облик СПД, разработанных и разрабатываемых в России, США и Европе, в том числе магнитная система с положительным градиентом индукции в разрядном канале и последовательным включением катушек намагничивания в разрядную цепь; разрядная камера в виде полутора из боронитридной керамики, 2-х полостной газораспределитель для обеспечения азимутальной равномерности потока ксенона в рабочем канале; полый катод с термоэммиттером из гексаборида лантана с Т-образным каналом и танталовым геттером; импульсная схема поджига (напряжение - 300 В, ток - 5 А). Впервые применено новое рабочее тело для космических ЭРД: благородный ксенон.

1981-2012 СПД на российских космических аппаратах

С 1981 года началась эксплуатация СПД в составе связных КА на геостационарных орбитах. В составе КА «Поток» и «Луч» применялся двигатель М-70 (СПД-70). На рисунке 4 приведена фотография двигательного блока (ДБ) коррекции с СПД-70 и блоком газораспределения. Параметры СПД-70: мощность – 760 Вт, удельный импульс тяги – 1450 с. Впервые в магнитной системе двигателя использовались магнитные экраны, а для управления расходом в контуре автоматической стабилизации разрядного тока применен термодроссель. Четыре СПД-70 использовались для компенсации ошибок выведения, приведения КА в точку стояния и коррекции орбиты в направлении «запад – восток».

В 1986 году проведены космические испытания ЭРДУ с СПД-70 в составе КА «Плазма-А» с термоэмиссионной ядерной энергоустановкой ТЭУ-5. для коррекции и активной стабилизации КА «Плазма» с ТЭУ (рисунок 5). Впервые катод двигателя работал в режиме постоянной готовности двигателей к включениям для управления угловым положением КА.

С 1994 года в составе КА «Галс», «Экспресс» и других российских КА нашли применение более мощные СПД-100 разработки ОКБ «Факел». На рисунке 6 приведена фотография ДБ коррекции с СПД-100 и блоком газораспределения. Параметры СПД-100: мощность – 1350 Вт, удельный импульс – 1500 с. Впервые СПД в составе КА на геостационарной орбите использовались для коррекции орбиты в направлении «север – юг». В 1993 году результаты разработки ЭРДУ с СПД-100 для КА «Галс» были представлены на международной конференции в Сиэтле, США [3].

В 2003 году были выведены на орбиту два КА «Ямал-200» с восемью СПД-70, с помощью которых выполнялись операции довыведения, ориентация и коррекция орбиты КА в направлениях: «север - юг», «восток - запад», разгрузки маховиков системы стабилизации углового положения. Практически реализован для КА принцип: все маневры только с помощью ЭРД («All EP»). На рисунке 7 приведена фотография КА «Ямал» с ДБ СПД-70.

Всего до настоящего времени на 60 российских КА работали и работают 270 СПД- 70 и СПД-100.



Рис.4. Двигатель СПД-70, 1981 год

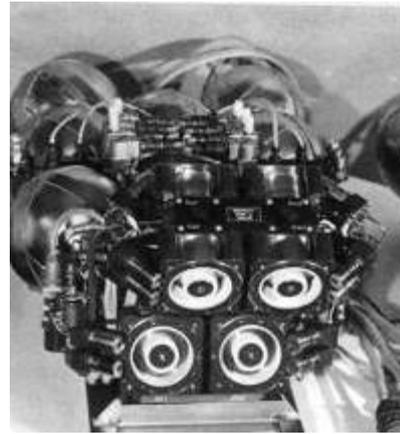


Рис.5. ЭРДУ с СПД для КА «Плазма-А» с ТЭУ5, 1986 год



Рис.6. Двигатель СПД-100, 1991 год



Рис.7. СПД-70 на КА «Ямал», 2003 год

1991-2012 Российские СПД в США и Европе. Квалификация СПД по международным стандартам. СПД в составе зарубежных КА

В 1991 году по инициативе академика А. Коротева в ОКБ «Факел» и ИЦ имени М.В. Келдыша успешно проведены демонстрационные испытания СПД в России с участием экспертов из США. Высокий уровень разработок СПД был подтвержден на международном уровне [4].

В 1992 году для продвижения СПД на мировой рынок космической продукции между ОКБ «Факел» и Space System/Loral было заключено соглашение о создании совместного предприятия. Первые успешные испытания СПД-100 в США были проведены в 1992 году на стенде Х. Кауфмана, который был привлечен как эксперт и оказывал большое содействие российским специалистам на всех стадиях квалификации СПД-100 по международным стандартам. В 1992-1993 годах были проведены параметрические и 5760-часовые ресурсные испытания в NASA и JPL. К 1996 году была завершена квалификация СПД-100 по международным стандартам и были заключены первые контракты на поставку СПД-100 (включая блок газораспределения). Результаты квалификации СПД-100 были учтены при поставках этих двигателей российским заказчиком. Фотография СПД-100В приведена на

рисунке 8, на рисунке 9 – интегрированная сборка двух СПД на поворотном механизме для управления вектором тяги.

С 2004 году по настоящее время на 16 американских и европейских КА работали и работают 80 СПД-100В. Опыт эксплуатации двигателя подтверждает совместимость с системами КА, а также новые возможности применения для стабилизации углового положения и довыведения КА [5].

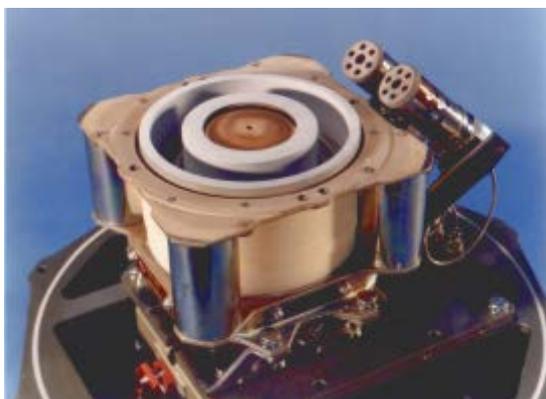


Рис.8. Двигатель СПД-100В, 1996 год

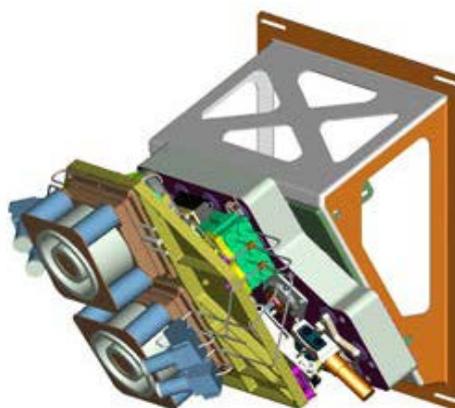


Рис.9. Интегрированная сборка двух СПД-100В на поворотном устройстве

Российские специалисты принимали и принимают участие в совместных работах с европейскими космическими фирмами, в частности, с SEP (Snecma) – создание двигателя PPS-1350 для КА «Smart 1» [6] (рисунок 10), Astrium – интеграция СПД-100 с поворотным механизмом в составе КА (рисунок 11).



Рис.10. PPS-1350 «Smart 1», полет Земля-Луна, 2003 год



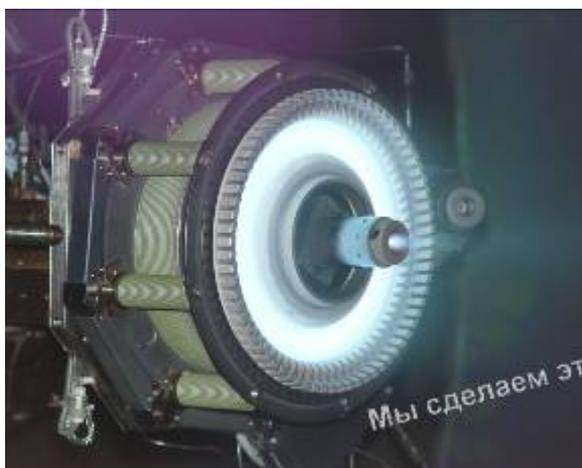
Рис.11. СПД-100В на КА «Inmarsat», Astrium

XXI век Новые вызовы для СПД.

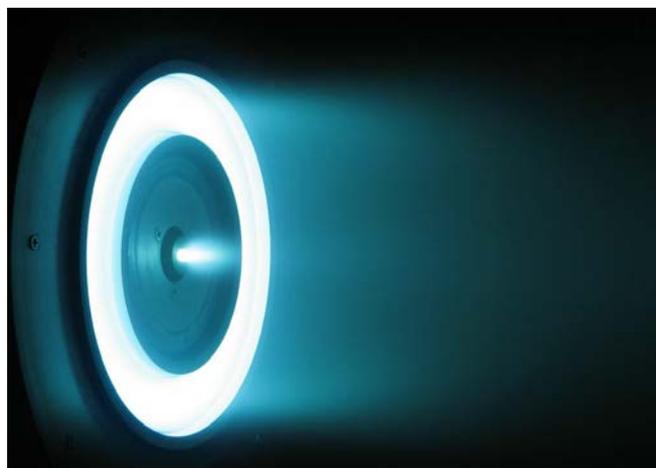
Транспортные энергетические модули.

В XXI веке развитие космической энергетики создает условия для решения транспортных задач в космосе с использованием ЭРД, в частности СПД средней и большой мощности.

Для межорбитальных перелетов, в частности, для выведения современных тяжелых КА на геостационарные орбиты в России разработаны двигатели СПД мощностью 5...6 кВт. Первые демонстрационные испытания российского двигателя СПД-140 были проведены в 1996 году в NASA в связи с планировавшимся участием в программе Teledesic. В 2005 году в США закончена квалификация двигателя ВРТ-4000 мощностью 4.5 кВт. В новых разработках СПД средней и большой мощности рассматривается возможность центрального расположения катода (рисунки 12, 13)



**Рис.12. СПД-140DM8, 5 кВт,
центральный катод**



**Рис.13. HET, 6 кВт, США
центральный катод**

Технология СПД не ограничивает предельный уровень электрической мощности, потребляемой для создания реактивной тяги при осуществлении транспортных операций в ближнем и дальнем космосе. Первый СПД мощностью до 30 кВт был создан и испытан в России к началу 80-х годов XX века (рисунок 14). В период с 2001 года по настоящее время проведены испытания единичных модулей на 20 кВт и 50 кВт [8, 9] (рисунок 15).



Рис.14. СПД-290, 30 кВт, 1980 год

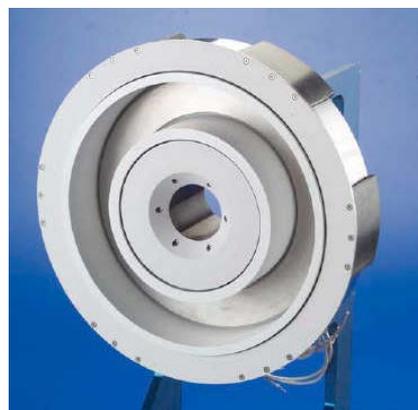


Рис.15. NASA HET 300M, 20 кВт

Применение кластеров СПД позволяет расширить диапазон применения с использованием уже разработанных двигателей. На рисунке 16 представлены различные варианты исполнения ЭРД мощностью 200 кВт на базе СПД [9].

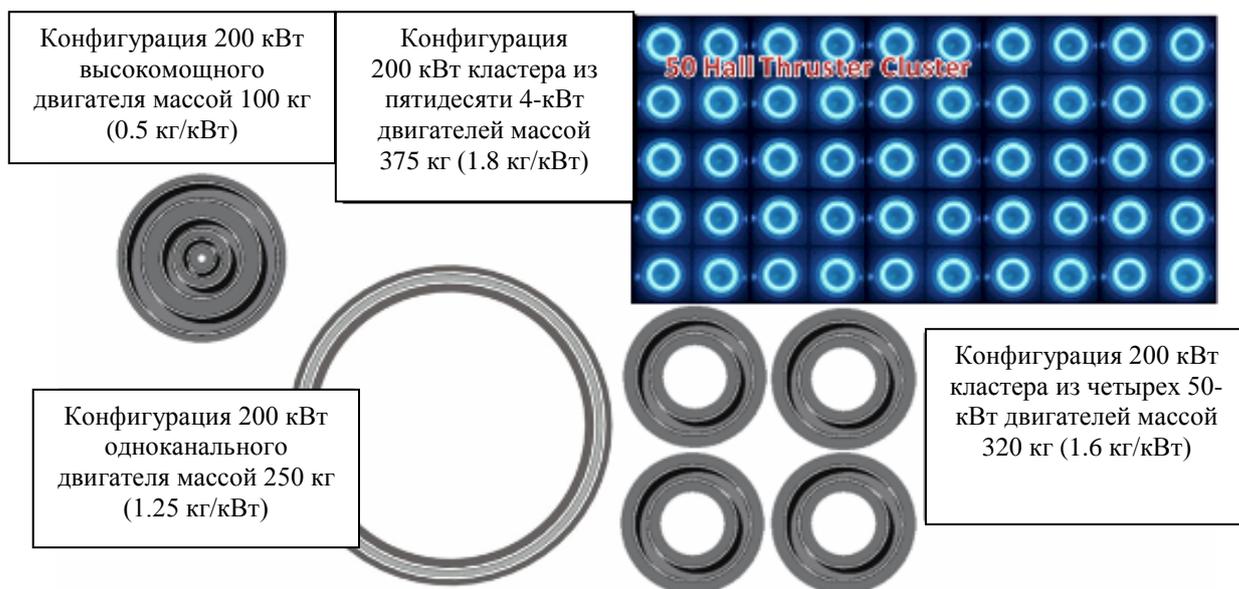


Рис.16. Различные конфигурации СПД суммарной мощностью 200 кВт

Новые вызовы XXI века для СПД: высокий удельный импульс – более 3000 с и ресурс – до 15000 часов. В 2000 году в России разработана первая инженерная модель высоковольтного СПД на базе СПД-100. При испытаниях в России и США достигнут удельный импульс более 3200 с на ксеноне при разрядных напряжениях до 1250 В и мощности 2.3 кВт [7]. В США при испытаниях двигателей 457М на криптоне получен удельный импульс 4900 с [8].

На квалификационных образцах СПД-100 в России и ВРТ-4000 в США ресурсные испытания были продолжены для оценки предельной наработки на отказ. После ~ 10000 часов оба двигателя остались в работоспособном состоянии. Анализ результатов испытаний, в частности, отсутствие износа стенок рабочего канала после 6000 часов работы (для СПД-100 – на внутренней стенке, для ВРТ-4000 – на внутренней и наружной стенках) позволяет прогнозировать достижимый ресурс СПД не менее 15000 часов. Основным условием создания СПД с большим ресурсом («immortale thruster») является «магнитное экранирование» («magnet shielding») стенок рабочего канала [10].

Наземные испытания СПД большой мощности должна проводиться в испытательных камерах с высокой производительностью вакуумной откачки. В испытательных камерах США вакуумная откачка – более 400000 л/с, в Европе – более 200000 л/с. При отработке ЭРДУ 500-кВт класса вакуумная откачка должна быть еще более. Одним из путей решения проблемы рассматриваются варианты разработки ЭРДУ на основе кластеров двигателей. Опыт создания первых СПД продемонстрировал эффективность для отработки ЭРДУ и ее элементов прямых космических испытаний с использованием МКС и транспортных модулей.

ЭРДУ с СПД для малых КА

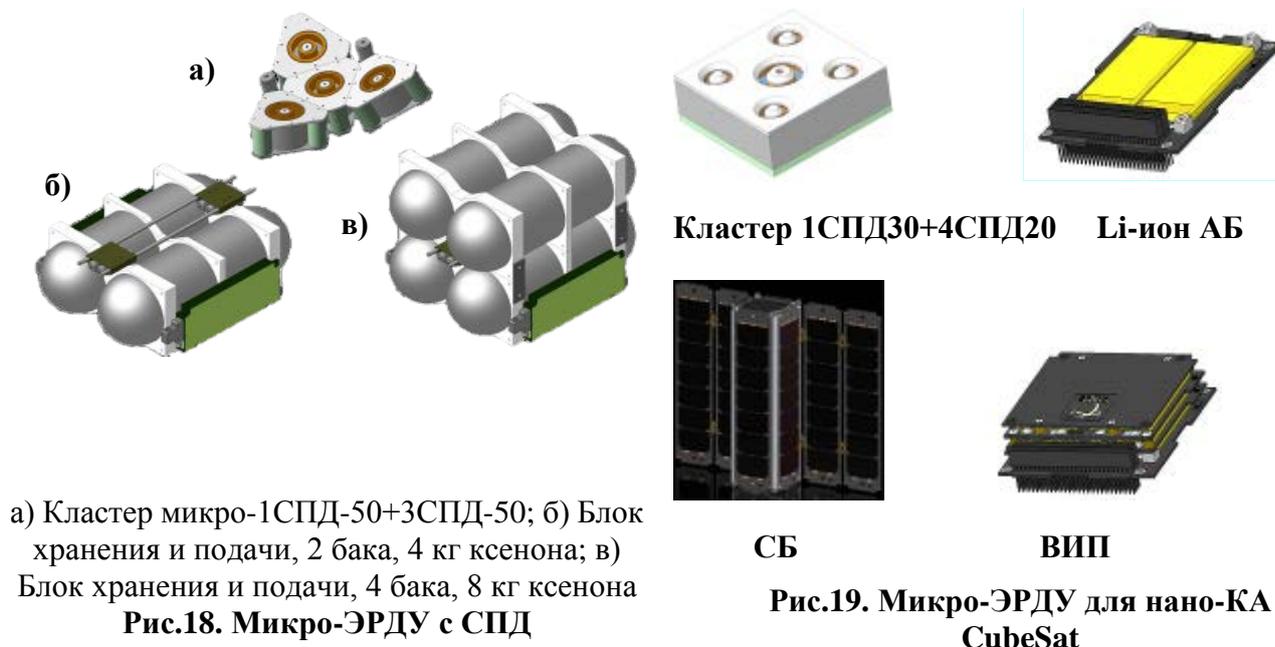
Одним из направлений развития космической техники в XXI веке является создание малых КА: микро- и нано- КА. На этих КА также возможно применение СПД малой мощности с прямым подключением к солнечным батареям. На рисунке 17 приведена фотография микро-ЭРДУ «ЭОЛ-2010», разработанная с участием студентов и выпускников Балтийского федерального университета имени Э. Канта. При разработке этой установки использовался опыт создания первых КДУ «ЭОЛ» и последующих разработок ОКБ «Факел», а также космические технологии ОАО «Сатурн».



Рис.17. Микро ЭРДУ «ЭОЛ-2011» для малых КА

Применение микро-ЭРДУ перспективно для группировок малых КА (например, в системе Iridium нового поколения и др.). На рисунках 18 и 19 представлены концепции таких микро ЭРДУ на базе технологий ОКБ «Факел» и ОАО «Сатурн». Дальнейшая миниатюризация ЭРДУ с микро-СПД возможна в рамках создания нано-КА типа CubeSat. Эта работа позволяет оперативно проверять и внедрять новые технические решения.

Например, микро-СПД с постоянными магнитами, катоды для микро-СПД, быстродействующие регуляторы расхода для импульсных СПД, новые алгоритмы управления с прямым подключением СПД к солнечным батареям. Привлечение к этой работе студентов и молодых специалистов будет способствовать подготовке специалистов в области ЭРД.



Заключение

В рукописи К.Э. Циолковского «Исследование мировых пространств реактивными приборами» впервые была сформулирована идея ЭРД. Приоритет российского ученого подтвержден документами: В Архиве Российской Академии Наук бережно хранится рукопись статьи К.Э. Циолковского, написанной им в 1902 году.

14 декабря 1964 года «впервые в космической технике для целей ориентации был успешно опробован плазменный двигатель». Идея ЭРД впервые была реализована в космосе.

В 1972 году впервые в мире в космосе были испытаны СПД, которые были применены для точной коррекции орбиты КА «Метеор». В космосе начали и продолжают работать более 350 ЭРД с замкнутым дрейфом электронов с ускорением ксеноновой плазмы в электромагнитном поле, идея которых была предложена учеными ИАЭ им. Курчатова А. Жариновым и А. Морозовым.

Авторы надеются, что в истории сохранится Светлая память об ученых, специалистах – участниках создания первых космических СПД: А. Морозов, Г. Щепкин, Ю. Есипчук, Ю. Шаров, В. Михайлюченко, А. Трофимов, Ю. Рылов, Л. Новоселов, Д. Севрук, Р. Снарский, Н. Масленников, Б. Архипов, Г. Комаров, Б. Мерзляков, Э. Беседин, А.М. Тарасов, А. Пейсахович, В. Стоянов и многие другие.

Библиографический список

1. Л.А. Арцимович, А.М. Андронов, А.И. Морозов, Р.К. Снарский, Ю.П. Рылов, К.Н. Козубский, Г.Н. Тилинин и др. Космические исследования, 12, №3, 451-468 (1974).

2. К 30-летию работы СПД в космосе. А. Морозов, К. Козубский, В. Мурашко, Ю. Рылов, В. Ходненко, В. Ким, Г. Попов, В. Докукин и др. Физика плазмы, 2003, том 29, № 3, с.261-301.
3. A. Bober, K. Kozubsky, G. Komarov, A. Kozlov, N. Maslennikov, A. Romashko. «Development and Qualification Test of an SPT Eclectic Propulsion System for «Gals» Spacecraft», 23rd International Electric Propulsion Conference, Seattle, Washington, 1993.
4. J. Brophy, J. Barnett, J. Sancovic, D.A. Barnhart, «Performance of the Status Plasma Thruster SPT100», AIAA-92-3155 (1992).
5. R.L. Corey and D. J. Pidgeon, «Electric Propulsion at Space Systems/Loral», IEPC-2009-270.
6. Milligan D., Gestal D., Estublier D., Koppel C., «SMART 1 Electric Propulsion Operations», AIAA – 2004-3436.
7. D.H. Manzella, D. Jacobson and R. Jankovsky, «High Voltage SPT Performance», AIAA Paper 01-3774 (2001).
8. D.H. Manzella, et al., «Laboratory Model 50 kW Hall Thruster», AIAA Paper 02-3676 (2002).
9. R. Florenz, A.D. Gallimore, P. Peterson, «Development Stat of a 100-kw Class Laboratory Nested Channel Hall Thruster», IEPC-2011-246 (2011).
10. G. Mikellides, I. Katz, R. R. Hofer, D. M. Goebel, K. de Grys, and A. Mathers, «Magnetic Shielding of the Channel Walls in a Hall Plasma Accelerator», Phys. Plasmas, 18, 3, 033501 1-18 (2011).

Информация об авторах

КОЗУБСКИЙ Константин Николаевич, главный конструктор ФГУП ОКБ «Факел», к.т.н.
236001, г. Калининград, Московский проспект, 181;
тел.: +74012556662; e-mail: fakel@gazinter.net

КОРЯКИН Александр Иванович, заместитель генерального конструктора ФГУП ОКБ «Факел».
Россия, 236001, г. Калининград, Московский проспект, 181;
тел.: +74012556601; e-mail: fakel@gazinter.net

МУРАШКО Вячеслав Михайлович, генеральный конструктор ФГУП ОКБ «Факел», к.т.н.
Россия, 236001, г. Калининград, Московский проспект, 181;
тел.: +74012556601; e-mail: fakel@gazinter.net