

## **Обзор работ по электроракетным двигателям в Государственном научном центре ФГУП «Центр Келдыша»**

А.И. Васин, А.С. Коротеев, А.С. Ловцов, В.А. Муравлев, А.А. Шагайда, В.Н. Шутов

### **Аннотация**

Статья посвящена описанию работ по созданию электроракетных двигателей, проводящихся в Центре Келдыша. Приведен обзор достижений в области разработки холловских и ионных двигателей, а также исследования основных физических процессов, протекающих в двигателях данного типа. Дано краткое описание экспериментальной базы, позволяющей проводить полный цикл испытаний изделий на стадии наземной отработки.

### **Ключевые слова**

космический аппарат; электроракетный двигатель; ионный двигатель; холловский двигатель

### **Введение**

Одной из основных задач развития космических средств является развертывание и восполнение орбитальных группировок космическими аппаратами (КА) нового поколения различной размерности с длительными сроками активного существования. Применение электроракетных двигателей (ЭРД) вместо химических двигателей позволяет увеличить срок службы спутников и долю полезной нагрузки за счет более экономного расходования рабочего тела. Основная область современного использования ЭРД – коррекция орбиты КА. Кроме того, в последнее время активно прорабатывается применение ЭРД для решения транспортных задач в ближнем и дальнем космосе.

Центр Келдыша принимает активное участие в разработке ЭРД различных типов [1]. В последнее время основные работы по ЭРД в Центре Келдыша ведутся в направлении разработки холловских и ионных двигателей. Данные типы двигателей нашли наиболее широкое применение в мировой практике использования ЭРД в составе КА различного

назначения. Работы ведутся как в рамках Федеральной космической программы России, так и в рамках договоров с иностранными заказчиками.

### Холловские двигатели

В Центре Келдыша разработан типоряд холловских двигателей с мощностью от 200 Вт до 6 кВт и тягой от 10 до 380 мН. Основные характеристики двигателей представлены в таблице 1.

Таблица 1

#### Основные характеристики холловских двигателей Центра Келдыша.

Двигатель	КМ-45	КМ-60	КМ-88	КМ-5	КМ-7
Мощность, кВт	0,2-0,45	0,45-1,1	1-2,5	1,35-2,5	3,5-6
Тяга, мН	10-28	30-50	50-105	80-140	200-380
Удельный импульс, с	1250-1500	1250-2200	2000-3000	1600-2100	1700-2650

Двигатель КМ-45 (рисунок 1) с номинальными значениями тяги и мощности 18 мН и 350 Вт разработан по заказу Индийской организации по космическим исследованиям (ISRO) и предназначен для малых КА (до 500 кг) [2]. Двигатель прошел полный цикл наземной отработки в соответствии с требованиями заказчика, его летные испытания должны были состояться в составе КА GSAT-4 в 2010 году, однако из-за нештатной работы третьей ступени ракеты-носителя КА не был выведен на орбиту.



Рис.1. Холловский двигатель КМ-45

Двигатель КМ-60 разрабатывается для новой спутниковой платформы ОАО «ИСС имени академика М.Ф. Решетнева» «Экспресс-1000». При мощности 900 Вт и тяге 42 мН удельный импульс на начало ресурса составляет более 2000 с. В рамках работы создается блок коррекции (БК), который включает в себя не только двигатель, но и блок управления

расходом. Наземная отработка БК полностью завершена. Проведены ресурсные испытания БК в течение более 4100 часов, суммарный импульс тяги за время испытаний превысил 600 кН×с. На момент окончания испытаний БК оставался работоспособным, испытания прекращены из-за достижения требуемых параметров ресурса. Катоды для КМ-60 прошли автономные ресурсные испытания на число включений, два катода наработали около 20000 включений каждый. Внешний вид двигателя КМ-60 до и после ресурсных испытаний приведен на рисунке 2. Закончено изготовление первой летной партии и проведены приемо-сдаточные испытания БК. В 2013-2014 годах планируется провести летные испытания БК на базе двигателя КМ-60.



**Рис.2. Холловский двигатель КМ-60 до начала ресурсных испытаний и после их окончания**

По заказу ISRO разработан двигатель КМ-88 (рисунок 3), который при номинальной мощности 1650 Вт обладает тягой 72 мН и удельным импульсом более 2100 с [3]. Двигатель прошел полный цикл наземной отработки, включая вибрационные испытания при очень высокой нагрузке (21  $g_{RMS}$  по трем осям). Изготовлена первая летная партия двигателей, которая поставлена заказчику. Планируются летные испытания двигателей в составе КА «ACS-1». В составе двигателя использованы вольфрам-бариевые катоды, которые прошли цикл автономной отработки, включая ресурсные испытания на 4000 включений.



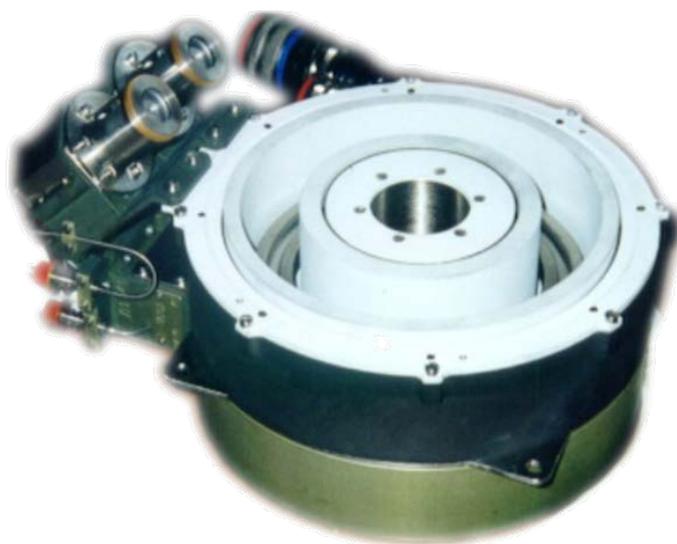
**Рис.3. Холловский двигатель КМ-88**

В июне 2002 года начаты летные испытания двигателя КМ-5 (рисунок 4) в составе серийного геостационарного связного КА «Экспресс А4» [2]. Двигатель используется для удержания аппарата по наклонению. Общая наработка двигателя составила более 2000 часов. Двигатель разрабатывался как многорежимный на диапазон мощности 1.35...2.5 кВт. В составе КА «Экспресс А4» двигатель использовался на режиме с мощностью 1.35 кВт.



**Рис.4. Холловский двигатель КМ-5**

Двигатель КМ-7 (рисунок 5) рассчитан на три уровня мощности – 3.5/4.5/6.0 кВт, номинальная мощность – 4.5 кВт [2]. Двигатель разработан по заказу SPI Inc. (США), прошел наземную экспериментальную отработку для летных испытаний в составе КА «Экспресс А3», однако летные испытания не состоялись из-за неготовности системы питания и управления двигателя.

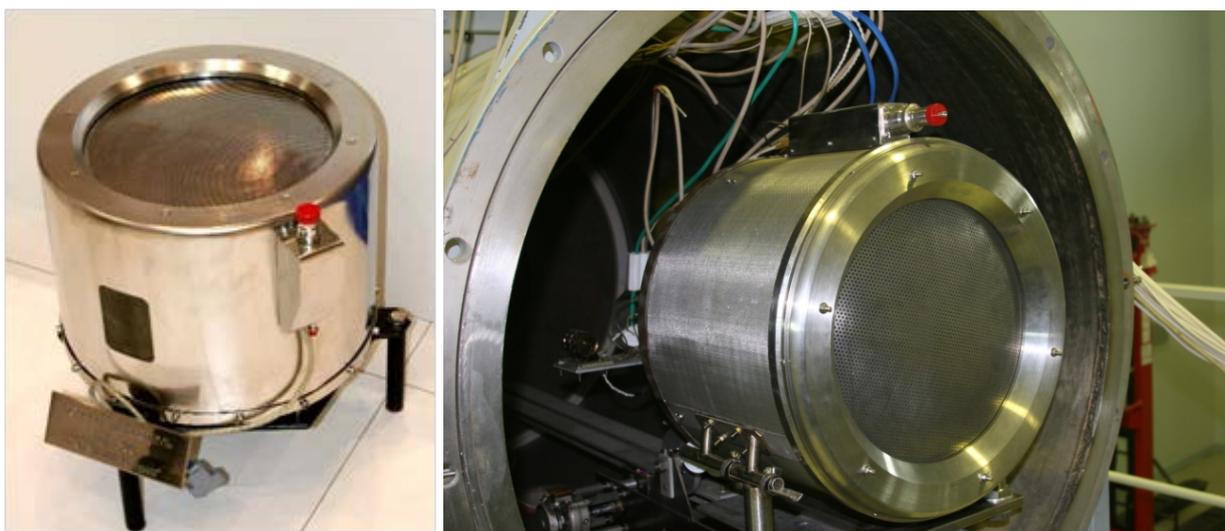


**Рис.5. Холловский двигатель КМ-7**

### **Ионные двигатели**

В Центре Келдыша развернуты работы по разработке ионных двигателей различной мощности. Проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на решение основных проблем связанных с созданием ионных двигателей и отрабатываются технологии изготовления двигателей.

Разработаны и испытаны лабораторные модели двигателей ИД-300 и ИД-300В (рисунок 6). Двигатель ИД-300 мощностью 2...4 кВт, обладающий тягой 80...120 мН при удельном импульсе 3500...4500 с является прототипом двигателя, который может использоваться при коррекции орбиты тяжелых геостационарных КА.



**Рис.6. Ионные двигатели ИД-300 и ИД-300В**

Одним из перспективных направлений развития космической техники является использование ЭРД для осуществления транспортных операций в околоземном космосе и

межпланетных перелетов. В этой связи в России с 2010 года реализуется проект по созданию транспортно-энергетического модуля, оснащенного электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) с суммарной электрической мощностью 1 МВт и удельным импульсом тяги до 7000 с.

Для отработки технологии создания высокоимпульсных ионных двигателей с учетом опыта, полученного при разработке двигателя ИД-300, создана модель высокоимпульсного ионного двигателя ИД-300В. Номинальная мощность двигателя 10 кВт при тяге 220 мН и удельном импульсе 7000 с.

Разработан эскизный проект двигателя ИД ВМ, который планируется использовать в качестве основы при создании ЭРДУ мегаваттного класса. Двигатель имеет номинальную мощность 32 кВт при тяге 725 мН и удельном импульсе 7000 с.

### Стендовая база

Центр Келдыша обладает современной стендовой базой, позволяющей проводить полный цикл отработки изделий. Стендовая база включает в себя установку для климатических испытаний, вибростенды и ударные стенды для проведения испытания изделий на внешние воздействия, установки для проведения огневых и ресурсных испытаний катодов, установку для проведения тепловакуумных испытаний, установку для измерения вектора тяги двигателей.

Для огневых и ресурсных испытаний двигателей используются криовакуумные камеры КВУ-35 и КВУ-90 (рисунок 7), оснащенные тягоизмерительными устройствами и другим диагностическим оборудованием.



Рис.7. Криовакуумные камеры КВУ-35 и КВУ-90

Вакуумная камера КВУ-35 имеет диаметр основной части вакуумного отсека 3 м и объем 35 м<sup>3</sup>, оснащена криогенными насосами общей производительностью 42 м<sup>3</sup>/с. Камера оборудована системой управления и измерения параметров двигателя, которая позволяет вести испытания в полностью автоматическом режиме. Основное назначение камеры – проведение ресурсных испытаний холловских двигателей.

Вакуумная камера КВУ-90 имеет диаметр 3.8 м и объем 90 м<sup>3</sup>, оснащена криогенными насосами общей производительностью по ксенону 129 м<sup>3</sup>/с. Камера оснащена двумя предкамерами, которые позволяют производить оперативные испытания и замену двигателей без напуска атмосферы в основную часть вакуумной камеры. Камера используется для огневых испытаний холловских и ионных двигателей.

### **Научно-исследовательская работа**

Исследовательская программа направлена, главным образом, на решение ключевых проблем создания ЭРД с высоким удельным импульсом (свыше 2000 с).

Применительно к холловским двигателям проводятся исследования по оптимизации конструкции двигателей с высоким удельным импульсом, включая оптимизацию топологии магнитного поля [4, 5], проводятся работы по обеспечению ресурсных характеристик двигателей и стабильности их работы. Разработан спектроскопический метод диагностики плазмы для определения интенсивности процессов эрозии керамических элементов разрядной камеры двигателей [6, 7]. Тестирование метода показало, что скорость эрозии, измеренная методом спектроскопической диагностики плазмы, удовлетворительно совпадает с результатами прямых измерений уносимого материала. При отработке изделий активно применяется метод укороченных ресурсных испытаний, который позволяет кратно сократить время, необходимое для оценки ресурса двигателей [8]. Проводятся экспериментальные и численные исследования особенностей организации разряда, в частности, механизмов аномального транспорта электронов в скрещенных полях, включая аномальный дрейф, связанный с колебаниями плазмы [9].

В части ионных двигателей проводятся работы по исследованию физики разряда в газоразрядной камере двигателя (ГРК), ведутся работы по созданию математической модели ионного двигателя, включающей моделирование ГРК, ионной оптики с учетом теплового состояния элементов конструкции двигателя.

Ведутся работы по исследованию катодов ЭРД, включая исследование возможности применения новых, более эффективных типов эмиттеров и эмиттерных схем.

## Заключение

В Центре Келдыша создана полноценная экспериментальная база, позволяющая проводить полный комплекс наземной экспериментальной отработки ЭРД. Широким фронтом ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на создание новых образцов двигателей и уменьшение стоимости их отработки. Имеется опыт создания летных моделей двигателей и их серийного производства.

## Библиографический список

1. Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. М.: Машиностроение, 2008. 280 с.
2. Gorshkov O.A., Shagayda A.A., Muravlev V.A. The Experience of Hall Thruster Research and Development // Proceedings of the 57<sup>th</sup> IAC/IAF/IAA (International Astronautical Congress), Valencia, Spain, Oct. 2-6, 2006, IAC-06-C4.4.08.
3. Ганкин В.И., Горшков О.А., Гришанов О.В. и др. Создание холловского двигателя КМ-88 с высоким удельным импульсом // Вестник МАИ, т.17, №4, стр. 137.
4. Gorshkov O.A., Shagayda A.A. and Irishkov S.V. The Influence of the Magnetic Field Topology on Hall Thruster Performance // 42<sup>nd</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 9 - 12 July 2006, Sacramento, California, AIAA Paper 2006-4472.
5. Горшков О.А., Шагайда А.А. Критерий оптимальности конфигурации магнитного поля в ускорителе с замкнутым дрейфом электронов // ТВТ, 2008, Т. 46, № 4, с. 582-587.
6. Dyshlyuk E. N., Gorshkov O. A. Spectroscopic Investigation of a Hall Thruster Ceramic Acceleration Channel Erosion Rate // 42<sup>nd</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 9 - 12 July 2006, Sacramento, California, AIAA Paper 2006-4660.
7. Шмелев А.В., Ловцов А.С. Особенности эрозии изоляторов холловского двигателя при изменении расхода рабочего тела // ПЖТФ, 2012, т. 38, вып. 11, с. 95-103.
8. Lovtsov A.S., Gorshkov O.A., Shagayda A.A. Semi-Empirical Method of Hall Thrusters Lifetime Prediction // 42<sup>nd</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 9 - 12 July 2006, Sacramento, California, AIAA Paper 2006-4661.
9. Горшков О.А., Томилин Д.А., Шагайда А.А. Экспериментальное исследование структуры высокочастотных возмущений за срезом разрядного канала СПД с высоким удельным импульсом. // Физика плазмы, 2012, Т. 38, № 3, с.298-304.

## **Сведения об авторах**

ВАСИН Анатолий Иванович, ведущий научный сотрудник ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»,  
к.т.н.

125438, г. Москва, Онежская ул. 8;

тел.: (495) 456-63-29

КОРОТЕЕВ Анатолий Сазонович, генеральный директор ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»,  
д.т.н., профессор, академик РАН.

125438, Москва, Онежская ул., 8;

тел.: (495) 456-46-08; e-mail: [kerc@comcor.ru](mailto:kerc@comcor.ru)

ЛОВЦОВ Александр Сергеевич, начальник отдела ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», к.ф.-м.н.

125438, Москва, Онежская ул., 8;

тел.: (495) 456-64-65; e-mail: [lovtsov@kerc.msk.ru](mailto:lovtsov@kerc.msk.ru)

МУРАВЛЕВ Вячеслав Анатольевич, старший научный сотрудник ГНЦ ФГУП «Центр  
Келдыша».

125438, Москва, Онежская ул., 8;

тел.: (495) 456-96-93 доб. 576

ШАГАЙДА Андрей Александрович, ведущий научный сотрудник ГНЦ ФГУП «Центр  
Келдыша», к.ф.-м.н.

125438, Москва, Онежская ул., 8;

тел.: (495) 456-96-93 доб. 126

ШУТОВ Владимир Николаевич, ведущий инженер ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», к.т.н.

125438, Москва, Онежская ул., 8;

тел.: (495) 456-96-93 доб. 137