

СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

MODERN ELECTRIC PROPULSION SYSTEM FOR SMALL SATELLITES

В.В. Кошляков¹,
доктор
технических наук,
kerc@elnet.msk.ru;
V.V. Koshlakov

А.С. Ловцов¹,
кандидат физико-
математических наук,
lovtsov@kerc.msk.ru;
A.S. Lovtsov

М.Ю. Селиванов¹,
кандидат
технических наук,
selivanov@kerc.msk.ru;
M.Yu. Selivanov

Д.А. Томилин¹,
кандидат физико-
математических наук,
tomilin@kerc.msk.ru;
D.A. Tomilin

Н.К. Федянин¹,
аспирант,
nikita.fedyanin@gmail.com;
N.K. Fedyanin

В статье представлено состояние разработки современных электроракетных двигательных установок для малых космических аппаратов в АО ГНЦ «Центр Келдыша». Представлено описание двигательной установки на базе линейки холловских и ионных двигателей мощностью от 200 до 1400 Вт.

Ключевые слова:
малый космический аппарат;
двигательная установка;
ионный двигатель;
холловский двигатель;
ксенон; криптон.

DOI: 10.26162/LS.2025.67.1.007

ВВЕДЕНИЕ

Одной из приоритетных задач отечественной космической отрасли в ближайшей перспективе является форсированное развёртывание низкоорбитальных многоспутниковых группировок малых космических аппаратов (МКА) различного назначения. Одним из наиболее эффективных инструментов формирования таких группировок являются двигательные установки на базе электроракетных двигателей (ЭРДУ). Использование ЭРДУ в составе МКА обеспечивает эффективное доведение на целевую орбиту, разведение по орбитальным точкам и поддержание орбитального построения группировки с последующим сведением с орбиты, существенно снижая стоимость развёртывания группировки за счёт роста числа КА

This article presents KeRC current progress in the field of advanced electric propulsion system development for small spacecraft. It also provides description for a system based on a 200 to 1400 W line of Hall and ion thruster models.

Keywords:
small satellite;
propulsion system;
ion thruster;
Hall thruster;
xenon; krypton.

выводимых одной ракетой-носителем. Эффективность использования ЭРДУ для решения обозначенных задач продемонстрирована в проектах OneWeb и Starlink.

В европейском проекте OneWeb используется ЭРДУ мощностью ~400 Вт на базе электроракетных двигателей (ЭРД) холловского типа. На первом этапе развёртывания применялся СПД-50М (Абраменков Г.В., Вертаков Н.М., Дронов П.А., Каплин М.А. и др., 2013), в дальнейшем – ВНТ-350 компании Busek.

В составе КА американской группировки Starlink компании SpaceX применена ЭРДУ с существенно большей мощностью ввиду большей энерговооружённости КА в целом. В версии Starlink 1.5 мощность

¹ Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» (АО ГНЦ «Центр Келдыша»), Россия, Москва.

Joint Stock Company «Keldysh State Research Center» (JSC «Keldysh Research Center») Russia, Moscow.

- модульность, т.е. в состав ЭРДУ входят отработанные модули, способные работать в широком диапазоне параметров и имеющие универсальные интерфейсы для обеспечения совместимости с различными комплектациями ЭРДУ;
- использование современных достижений в области проектирования ЭРД с целью оптимизации удельных и габаритно-массовых характеристик составных частей ЭРДУ, повышения надёжности и удобства эксплуатации ЭРДУ;
- возможность использования в качестве рабочего тела криптона, стоимость которого в 8–10 раз ниже традиционного ксенона.

Модульная компоновка при наличии отдельных отработанных модулей позволит в короткие сроки проводить компоновку ЭРДУ под конкретную задачу, объем квалификации и её стоимость будут существенно ниже, чем при традиционном подходе к разработке новой ЭРДУ «с нуля». ЭРДУ в различных вариантах комплектации отвечает широкому спектру требований к средствам коррекции МКА перспективных низкоорбитальных многоспутниковых группировок.

Схема комплектации универсальной ЭРДУ для МКА приведена на рисунке 1.

ЭРДУ состоит из следующих модулей:

- блок хранения рабочего тела (БХРТ), в состав которого входят: баллон, заправочная горловина, пусковой клапан, датчик температуры. Объём баллона может быть выбран в зависимости от требований к массе заправки;
- блок подачи рабочего тела (БПРТ), в состав которого входят: клапан высокого давления, редуктор, ресивер, датчик температуры, датчик давления. Данный блок является универсальным для всех компоновок;
- блок управления расходом (БУР), в состав которого входят клапаны низкого давления, дроссели, термодроссели. Составные части БУР являются универсальными, однако настройка дросселей и компоновка индивидуальна для каждого типа двигателей.
- система питания и управления (СПУ), имеющая набор универсальных блоков (информационный блок управления, источник питания (ИП) катодов, ИП клапанов, ИП термодросселей и т.п.) и набор силовых блоков питания, индивидуальных для каждого типа двигателей.
- ЭРД, представленные тремя моделями: ионный двигатель ИД-100, холловский двигатель КМ-35, холловский двигатель КМ-55.

Концепция создания универсальной многопараметрической ЭРДУ базируется на том факте, что практически все составные части ЭРДУ способны работать в широком диапазоне параметров и не требуют

проведения полномасштабной наземной экспериментальной отработки для каждой параметрической точки. К примеру, для подтверждения надёжности и ресурса холловского двигателя достаточно показать экспериментально ресурс для предельной мощности разряда в двух точках – для максимального удельного импульса и для максимальной тяги как худший случай. Для остальных компонентов может быть использован аналогичный подход.

В зависимости от варианта исполнения, ЭРДУ комплектуются одним из трёх двигательных блоков, которые состоят из двигателя и БУР, а также БХРТ, БПРТ и СПУ.

В соответствии со схемой комплектации ЭРДУ имеет три варианта исполнения:

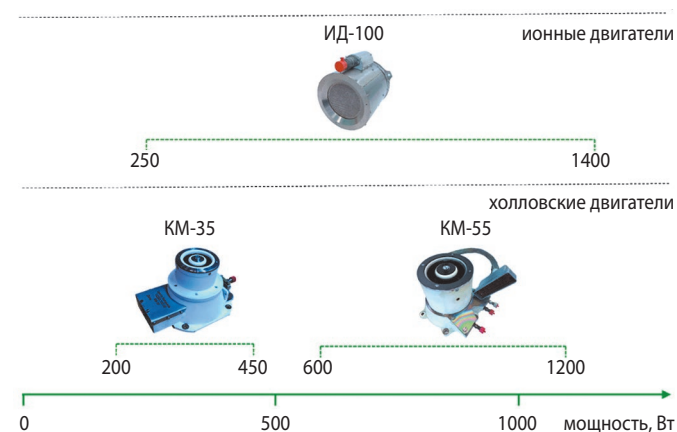
1. ЭРДУ на базе ионного двигателя ИД-100 (от 200 до 1400 Вт);
2. ЭРДУ на базе холловского двигателя КМ-35 (от 200 до 450 Вт);
3. ЭРДУ на базе холловского двигателя КМ-55 (от 600 до 1200 Вт).

На данном этапе разработки предполагается, что составные части ЭРДУ не имеют дублирования, за счёт чего достигаются компактная компоновка и высокие массово-габаритные характеристики. Вопросы дублирования решаются путём установки нескольких ЭРДУ при необходимости.

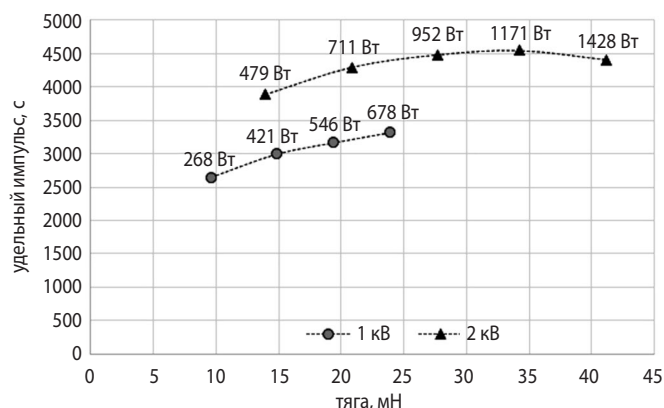
2. Основные технические характеристики ЭРДУ

Как было отмечено выше, типоряд двигателей в разрабатываемой ЭРДУ представлен тремя моделями. Диаграмма перекрываемой мощности двигателей представлена на рисунке 2.

Тяговые и удельные характеристики ЭРДУ напрямую зависят от параметров двигателей, комплектующих ЭРДУ.



рисунк 2. Диаграмма перекрываемой мощности двигателей в зависимости от комплектации

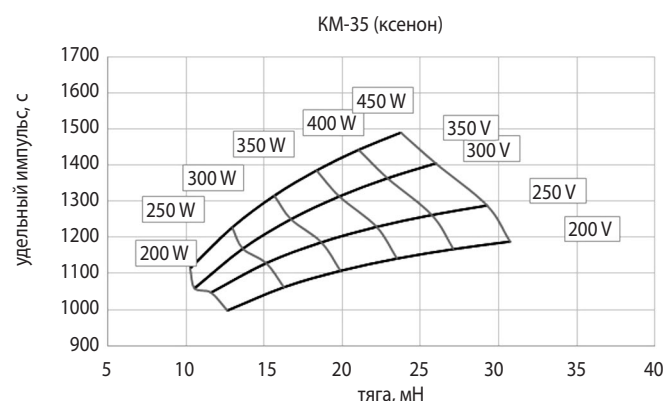


рисунк 3. Зависимости удельного импульса I_{sp} от тяги R для экспериментального образца ИД-100 при различных потенциалах эмитсионного электрода

ИД-100 представляет собой ионный двигатель (ИД) с ионизацией рабочего тела в разряде постоянного тока. Основными составными частями ИД-100 являются газоразрядная камера (ГРК), отвечающая за формирование плазмы посредством ударной ионизации нейтральной компоненты рабочего тела электронами, ионно-оптическая система (ИОС), извлекающая из плазмы ГРК ионы и создающая тягу посредством их электростатического ускорения, и нейтрализатор эмитирующий в пучок ускоренных ионов электроны, компенсируя его положительный заряд. Внешний вид экспериментального образца ИД-100 представлен на рисунке 1.

ИОС ИД-100 состоит из эмитсионного и ускоряющего электродов, выполненных из титана и имеющих диаметр перфорированной области 0,1 м. Для поддержания стабильности зазора между электродами при нагреве двигателя они оба имеют выпуклую форму, а их стрелы прогиба направлены в сторону пучка ионов. В состав ГРК входят корпус, катод, цилиндрический и конический аноды, коллектор и магнитная система, выполненная на основе самарий кобальтовых постоянных магнитов. Катод ГРК и нейтрализатор двигателя являются полыми катодами с эмиттерами из пористого вольфрама, пропитанного соединениями бария. Роль силового элемента в конструкции ИД-100 выполняет сам корпус ГРК, состоящий из нескольких соединённых между собой титановых фланцев.

ИД-100 может функционировать при использовании в качестве рабочего тела как ксенона, так и криптона. Для лучшего заполнения диапазона потребностей разработчиков КА в части удельного импульса, ИОС ИД-100 позволяет двигателю исправно функционировать в диапазоне потенциалов эмитсионного электрода от 1000 В до 2000 В. Полученные по результатам огневых параметрических испытаний экспериментального образца ИД-100 зависимости удельного



рисунк 4. Параметрическая карта рабочих параметров двигателя КМ-35

импульса от тяги при использовании в качестве рабочего тела ксенона представлены на рисунке 3.

Величина тяги, показанная экспериментальным образцом ИД-100, существенно превосходит результаты ближайших аналогов ИД, обладающих схожими массогабаритными параметрами. Достижение сравнительно высоких параметров эффективности в ходе первых испытаний экспериментального образца ИД-100 обусловлено интеграцией в схемы основных узлов двигателя ряда оригинальных технических решений. Магнитная система ГРК ИД-100 выполнена на основе сдвоенного полюса, позволяющего локализовать магнитное поле вблизи анодов и повысить однородность плазмы в объёме ГРК. ИОС ИД-100 обладает высокой эффективностью извлечения ионов из ГРК за счёт низкой величины зазора между электродами и шестиугольной формой их перфорации.

Холловские двигатели КМ-35 и КМ-55 конструктивно подобны друг другу и отличаются диаметром средней линии разрядного канала. В основу конструкции обоих двигателей заложена так называемая технология магнитного экранирования (*Mikellides G., Katz I. et al., 2014*), при использовании которой удаётся достигнуть высоких ресурсных характеристик и стабильности выходных параметров двигателя на протяжении всего срока активного существования. Достигается такой эффект за счёт такого сочетания конфигурации магнитного поля и выходной части разрядной камеры, при котором в области слоя ионизации и ускорения магнитные силовые линии практически параллельны стенкам разрядной камеры.

Двигатель КМ-35 предназначен для КА со сравнительно низкой доступной мощностью на борту, что характерно, например, для КА ДЗЗ. Диапазон его рабочей мощности не превышает 450 Вт. Зависимость

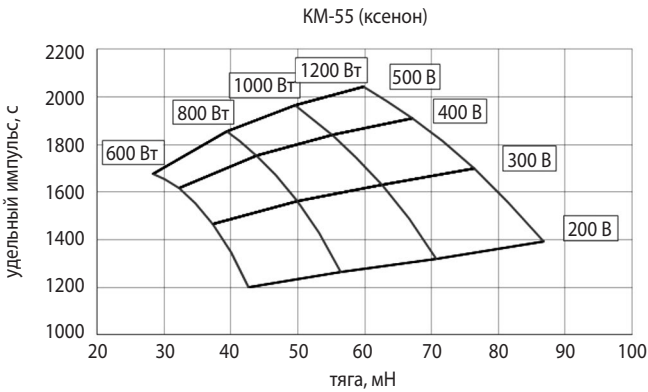


рисунок 5. Параметрическая карта рабочих параметров двигателя KM-55 при работе на ксеноне

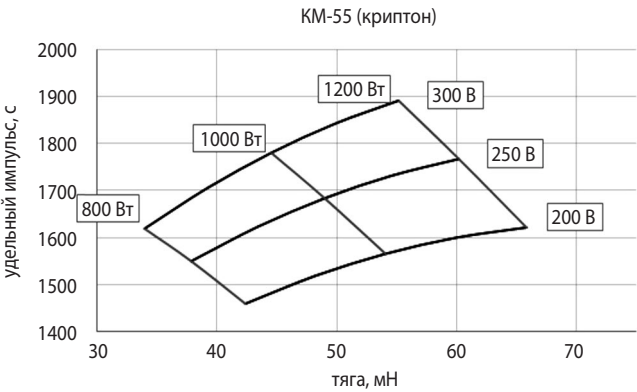


рисунок 6. Параметрическая карта рабочих параметров двигателя KM-55 при работе на криптоне

таблица 1 – Сводка проектных параметров ЭРДУ для МКА

комплектация ДУ	рабочее тело	диапазон тяги, мН	диапазон удельного импульса, с (кН·с/кг*)	ресурс работы, ч, не менее	масса ДУ (сухая), кг
КМ-35	Хе	10–30	1000–1500 (9,9–14,0)	3000	15
КМ-55	Хе	30–85	1200–2000 (11,2–18,6)	5000	18,7
КМ-55	Kr	35–65	1450–1900 (13,5–17,7)	4000	18,7
ИД-100	Хе	10–40	2500–4500 (23,3–41,9)	6000	19,5
ИД-100**	Kr	8–20	3150–5850 (29,3–54,5)	6000	19,5
Примечания * – с учётом запаса 5%. ** – расчётные параметры.					

таблица 2 – Состояние разработки основных составных элементов ЭРДУ

составная часть	разработчик	состояние разработки
ЭРД:		
КМ-35	АО ГНЦ «Центр Келдыша»	испытан экспериментальный образец, в том числе совместно с СПУ
КМ-55	АО ГНЦ «Центр Келдыша»	испытан экспериментальный образец
ИД-100	АО ГНЦ «Центр Келдыша»	испытан экспериментальный образец
БУР:		
клапан низкого давления	АО ГНЦ «Центр Келдыша»	заимствуется (имеет литеру «О»)
панели дросселей	АО ГНЦ «Центр Келдыша»	заимствуется (имеет литеру «О»)
СПУ:		
для КМ-35	АО «РКС»	проведены огневые стыковочные испытания с КМ-35
для КМ-55	АО «РКС»	отработка модулей экспериментального образца
для ИД-100	АО «РКС»	отработка модулей экспериментального образца
БПРТ:		
датчик давления	АО «НИИФИ»	заимствуется (имеет литеру «О1»)
датчик температуры	АО «НПО ИТ»	заимствуется (имеет литеру «О1»)
клапан высокого давления	АО ГНЦ «Центр Келдыша»	экспериментальные образцы
ресивер	АО ГНЦ «Центр Келдыша»	заимствуется (имеет литеру «О»)
редуктор	АО ГНЦ «Центр Келдыша»	экспериментальные образцы
БХРТ:		
баллон	ООО «Сафит»	заимствуется (выпускается серийно)
горловина заправочная	АО «НИИМаш»	заимствуется (имеет литеру «О»)
пусковой клапан	АО «НИИМаш»	заимствуется (имеет литеру «О»)

удельного импульса от тяги при различных параметрах разряда, полученная в ходе испытаний экспериментального образца двигателя КМ-35 приведена на рисунке 4.

Двигатель способен устойчиво работать в достаточно широком диапазоне по мощности (200–450 Вт) и в диапазоне напряжений от 200 до 350 В, обеспечивая при этом тягу от 10 до 30 мН (от 0,01 до 0,03 Н) и удельный импульс тяги от 1000 до 1500 с. Опция работы на криптоне для данного двигателя недоступна, что связано со низкой эффективностью ионообразования при работе на криптоне при маленьких геометрических размерах слоя ионизации и ускорения (*Shagayda Andrey A., Gorshkov Oleg A., 2013*). Основное рабочее тело двигателя КМ-35 ксенон.

Двигатель КМ-55 предназначен для КА большей энерговооружённости – диапазон его рабочей мощности достигает 1200 Вт. Двигатель является, по сути, глубокой модернизацией двигателя КМ-60 мощностью 930 Вт, который успешно эксплуатируется на орбите в составе геостационарного космического аппарата с 2014 года (*Shagayda Andrey A., Gorshkov Oleg A., 2013*).

Зависимость удельного импульса от тяги для различных параметров разряда экспериментального образца двигателя КМ-55 приведена на рисунке 5.

Как можно видеть, экспериментально подтверждённый диапазон мощности разряда на двигателе КМ-55 составляет от 600 до 1200 Вт при разрядном напряжении от 200 до 500 В. При таких параметрах разряда двигатель КМ-55 обеспечивает диапазон по тяге от 30 до 85 мН (от 0,030 до 0,085 Н), а по удельному импульсу – от 1200 до 2000 с.

Большие по сравнению с КМ-35 геометрические размеры двигателя позволяют использовать в качестве рабочего тела как ксенон, так и криптон. Результаты испытаний экспериментального образца КМ-55 на криптоне приведены на рисунке 6.

Диапазон по мощности разряда практически совпадает со случаем работы на ксеноне – от 800 до 1200 Вт, диапазон устойчивой работы по разрядному напряжению ниже, чем при работе на ксеноне и составляет от 200 до 300 В. Такие параметры разряда обеспечивают диапазон по тяге от 35 до 65 мН (от 0,035 до 0,065 Н) при удельном импульсе тяги от 1450 до 1900 с. Как можно видеть, при работе двигателя на криптоне доступные диапазоны по тяге и удельному импульсу несколько ниже, чем при работе на ксеноне, однако в случае развёртывания многоспутниковых группировок МКА существенно более низкая стоимость заправки и более высокая доступность криптона может быть решающим аргументом в пользу выбора этого рабочего тела.

Основные проектные параметры для трёх комплекций ЭРДУ для МКА на базе двигателей КМ-35, КМ-55 и ИД-100 приведены в таблице 1.

Текущее состояние разработки основных составных элементов ЭРДУ приведено в таблице 2.

ВЫВОДЫ

В АО ГНЦ «Центр Келдыша» разрабатываются современные ЭРДУ для МКА перспективных низкоорбитальных многоспутниковых группировок. Разработка ведётся с учётом принципов конвейерной сборки, критериев низкой стоимости, модульности и многорежимности с использованием относительно дешёвых рабочих тел.

ЭРДУ разрабатывается в трёх вариантах исполнения:

- на базе ионного двигателя ИД-100 (от 200 до 1400 Вт);
- на базе холловского двигателя КМ-35 (от 250 до 450 Вт);
- на базе холловского двигателя КМ-55 (от 600 до 1200 Вт).

На данном этапе разработки проведены огневые параметрические испытания экспериментальных образцов всех трёх двигателей совместно с БУР. Показана возможность функционирования в широком диапазоне параметров. На холловском двигателе КМ-55 и ионном двигателе ИД-100 подтверждена возможность эффективной работы на криптоне. Для холловского двигателя КМ-35 показано совместное функционирование с СПУ разработки АО «РКС».

Для других модулей ЭРДУ проводится экспериментальная отработка составных частей и их увязка в единые блоки.

список литературы

Абраменков Г.В., Вертаков Н.М., Дронов П.А., Каплин М.А. и др. Ракетные двигатели АО «ОКБ «Факел» для космических аппаратов опыт лётного применения и новые разработки // Космическая техника и технологии. 2023. № 4. С. 36-55.

Kostin A.N. et al. Development and qualification of Hall thruster KM-60 and the flow control unit // IEPC. 2013. 055.

Mikellides G., Katz I. et al. Magnetic shielding of a laboratory Hall thruster. I. Theory and validation // Journal of applied physics. 2014. 115. 043303.

Shagayda Andrey A., Gorshkov Oleg A. Hall-Thruster Scaling Laws // Journal of Propulsion and Power. 2013. Vol. 29, № 2. P. 466-474. DOI: 10.2514/1.B34650.

Статья поступила в редакцию 04.12.2024

Статья после доработки 05.12.2024

Статья принята к публикации 06.12.2024