

УДК 629.7.036.7.017.1

Роль и место электроракетных двигателей в Российской космической программе

Ю.Г. Гусев, А.В. Пильников

Аннотация

Основные направления развития двигательных установок (ДУ) космических аппаратов (КА) с использованием электроракетных двигателей (ЭРД) для научных исследований и практического использования космоса можно условно сгруппировать в пять основных групп. Каждая группа определяется уровнем мощностей ДУ и соответственно уровнем мощностей и типов ЭРД. Первая группа служит для обеспечения функционирования малых КА (50...500 кг) для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), метеорологии, картографии, и т.д., которые, как правило, располагаются на низких околоземных орбитах. Электроракетные двигательные установки (ЭРДУ) этой группы имеют сравнительно небольшую мощность до нескольких сотен ватт. Вторая группа, базирующаяся на ЭРДУ малых и средних мощностей ЭРД (1...2 кВт) для обеспечения работы систем коррекции и поддержания орбит КА массой в несколько тонн. Третья группа, задачи которой – обеспечить выполнение маневров тяжелых (5 тонн и выше) межорбитальных платформ (4...6 кВт ЭРД). Четвертая группа – ДУ с ядерным реактором (ЯЭУ) и мощностями ЭРД в 20...30 кВт для транспортных околоземных и лунных операций. Пятая группа – сверхмощные ДУ мегаваттного класса с мощностью ЭРД в 50...100 кВт для исследований дальнего космоса, транспортных операций и межпланетных перелетов.

Ключевые слова

двигатель; холловский; плазменный; электроракетный; космический; тяга; удельный импульс; мощность; двигательная установка; межорбитальный

Введение

Основными направлениями развития КА являются увеличение их срока активного существования (САС), оптимизация массы полезной нагрузки, энерговооруженности и

тяговооруженности, повышение надежности. Одно из перспективных направлений для решения поставленных задач – широкое внедрение ДУ на основе ЭРД.

В России и за рубежом разработаны ЭРДУ для решения многих задач на околоземных орбитах, исследований дальнего космоса автоматическими КА, создания базовых двигательных платформ на основе солнечных энергоустановок. К летным образцам ЭРД для рассматриваемых задач можно отнести российские СПД-70, СПД-100 разработки ОКБ «Факел», также КМ-5, КМ-45 разработки ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Д-55 разработки ФГУП ЦНИИмаш. Из зарубежных образцов летную отработку прошли ЭРД RIT-10 (Германия), Т-5 (Англия), PPS-1350 (Франция), NSTAR, ВРТ-2000, ВРТ-4000 (США).

Расширяется круг задач, для решения которых планируется использовать ДУ с ЭРД. Предполагается с помощью ЭРДУ реализовать довыведение КА с промежуточных орбит на рабочие (например, на геостационарные), межорбитальные транспортные операции и межпланетные перелеты.

Благодаря разделению источника энергии и рабочего вещества ЭРД позволяет обеспечивать высокую скорость истечения (до 100 км/с и более), но имеет малую тягу (от единиц до десятков и сотен грамм). Использование ЭРД в ДУ КА в большинстве случаев позволяет существенно увеличить массу выводимой полезной нагрузки и продлить САС КА.

По принципу действия ЭРД делятся на четыре основных класса. Классификация электроракетных двигателей приведена на рисунке 1.

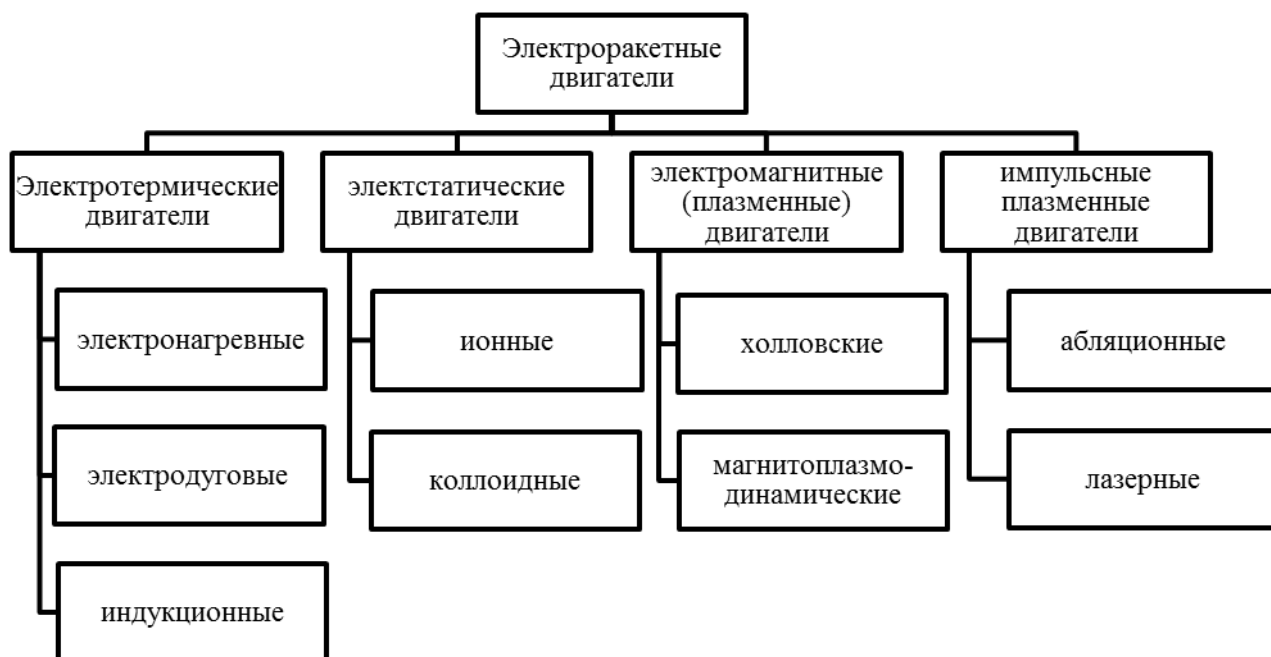


Рис.1. Основная классификация ЭРД

Из всех типов ЭРД наиболее отработаны и часто используются в ДУ КА ионные и холловские благодаря своим относительно высоким эксплуатационным характеристикам, таким, как удельный импульс, КПД и ресурс. Реже используются электротермические и импульсные плазменные двигатели, в основном на малых КА (МКА).

Электроракетные двигатели и двигательные установки КА для решения конкретных задач

В настоящее время все существующие и разрабатываемые ЭРДУ для обеспечения прикладного использования и научных исследований космического пространства, включая полеты к Луне, Марсу и другим небесным телам можно объединить в пять основных групп:

1. ЭРДУ с солнечной энергетической установкой (СЭУ) для малых космических аппаратов (50...500 кг), использующих малоразмерные и маломощные холловские двигатели типа СПД-25, электронагревные аммиачные двигатели (ЭНД) или абляционные импульсные плазменные двигатели (АИПД). Аппараты в основном используются группами, для картографии, ДЗЗ, метеорологии, связи и навигации.
2. Универсальные, недорогие ЭРДУ с СЭУ для коммерческих, телекоммуникационных и навигационных спутниковых систем на базе ЭРД мощностью 1...2 кВт.
3. ЭРДУ с СЭУ для тяжелых многоцелевых спутниковых платформ автоматических КА массой 3.5...5 тонн общей мощностью 20...25 кВт на базе 2-х режимных ЭРД мощностью ~ 5 кВт с регулируемым вектором тяги. Требование двухрежимности ДУ вызвано тем, что в дополнение к обычным задачам по коррекции и поддержанию орбиты КА добавляется задача довыведения КА на рабочую орбиту с промежуточной орбиты.
4. ЭРДУ с ЯЭУ, термоэмиссионным преобразователем энергии, электрической мощностью 100...250 кВт на основе высокоимпульсных ЭРД мощностью 20...30 кВт для многоразового межорбитального и лунного транспортного буксира.
5. ЭРДУ мегаваттного класса с ЯЭУ, турбомашинным преобразователем энергии с электрической мощностью в десятки мегаватт, на основе ЭРД мощностью 35... 100 кВт для межпланетного пилотируемого транспортного комплекса.

Первая и вторая группы ЭРДУ имеют практическую реализацию. Ими оснащено большое количество выведенных на орбиту и эксплуатирующихся КА. В основном это КА коммерческого применения, в двигательных платформах которых используются отработанные и прошедшие многолетнюю летную эксплуатацию ЭРД.

ЭРД из первой группы ориентированы на использование в ЭРДУ МКА. В бывшем СССР и в новой России эти двигательные установки традиционно комплектуются тремя типами ЭРД:

- 1) электронагревными двигателями (ЭНД);
- 2) холловскими (СПД-25) разработки ОКБ «Факел»;
- 3) абляционными импульсными плазменными двигателями (АИПД) разработки НИИ ПМЭ МАИ.

Перечисленные типы ЭРД представлены на рисунке 2.



Рис. 2. Типы ЭРД, применяемые в России на МКА

В таблице 1 приведены их основные технические характеристики.

Таблица 1 – Характеристики двигателей для МКА.

| Тип ЭРД | ЭНД | СПД 25 ОКБ “Факел” | АИПД-155 НИИ ПМЭ МАИ |
|----------------------------------|-------------|-----------------------|-------------------------|
| Мощность, Вт | 97 | 100 | 70...140 |
| Рабочее тело | Аммиак | Ксенон | Тефлон |
| Удельный импульс, м/с | 2500 | 8000...10000 | 13200 |
| Тяга, мН | 30 | 7 | 1,4...2,8 |
| Цена тяги, Вт/мН | 3,2 | 14,3 | 50 |
| Суммарный импульс тяги, к·Н*с | 10 | 21,3 | 30 |
| Масса (с топливом), кг | 14 | 13 | 14 |
| Удельная тяга, мкН/кг | 2143 | 538 | 200 |
| Эффективный удельный импульс | 714 | 1638 | 2140 |

Как видно из таблицы, процесс выбора ДУ для МКА не является однозначным. Различные категории двигателей имеют свои положительные и отрицательные стороны. В таблице предпочтительные параметры выделены зеленым (жирным), параметры, по которым данный двигатель проигрывает другим – красным (курсивом).

Следует отметить, что, несмотря на популярность МКА, их количество на российском рынке по сравнению с зарубежным незаслуженно мало [1].

В настоящее время ведущие российские предприятия занимаются созданием КА различного назначения на основе ЭРДУ малой и средней мощности. Каждая организация, как правило, разрабатывает свой КА и свою индивидуальную ЭРДУ, используя ЭРД типа

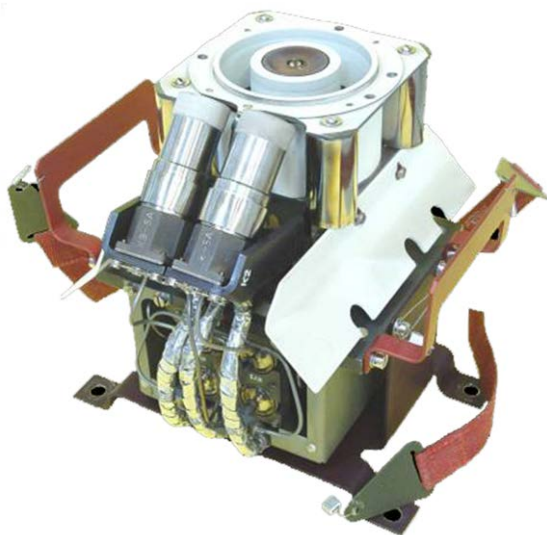
СПД-50, СПД-70, СПД-100 разработки ОКБ «Факел». Так, например, в РКК «Энергия» разработаны и проходят успешную летную эксплуатацию КА «Ямал-100», «Ямал-200» с ДУ на базе восьми СПД-70 мощностью 660 Вт, тягой 40 мН, удельным импульсом 1450 с. На базе таких же ЭРД в ГКНПЦ им М.В. Хруничева разработаны и проходят летную эксплуатацию КА «Kazsat-1» и «Kazsat-2». В НПП ВНИИЭМ создан КА «Конопус-В» с ДУ на базе двух ЭРД СПД-50 с удельным импульсом 1250 с. Там же разработан КА «АРКОН – 2М» с двумя двигателями СПД-100В с тягой 83 мН, мощностью 1350 Вт и удельным импульсом 1600 с. В ОАО «ИСС имени академика М.Ф. Решетнева» разрабатываются КА на базе спутниковой платформы семейства «Экспресс-1000» (малые и средние КА), а также тяжелые КА серии «Луч» на базе космической платформы «Экспресс-2000» с двигателями СПД-100.

Одним из перспективных моделей двигателей является СПД-100Д мощностью ~2 кВт, удельным импульсом 2750 с. Двигатель высоковольтный, двухрежимный. Однако в настоящее время он не прошел полный цикл наземной отработки, в частности, не подтвержден его ресурс. На базе СПД-100Д разрабатывается КА «Луч-4», где будет использовано восемь таких ЭРД общей тягой 560 мН. Двигатель может работать в режиме высокого удельного импульса тяги при напряжении 800 В и в режиме максимальной тяги при напряжении 300 В.

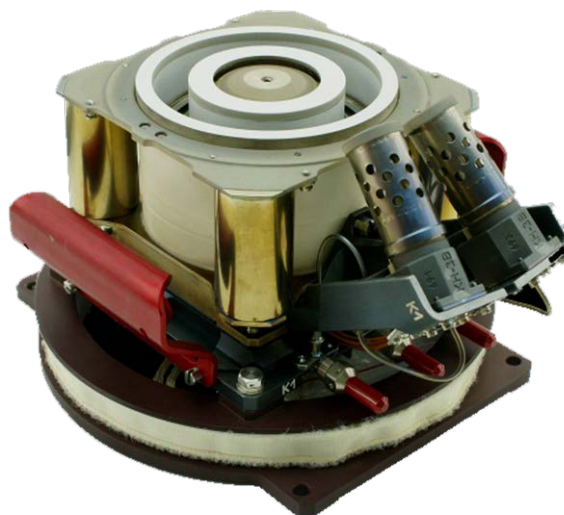
Летные образцы российских ЭРД малой и средней мощности, представлены на рисунке 3.

ЭРДУ средней мощности для КА массой 1...2 тонны разрабатываются в ведущих странах мира уже более 30 лет и используются в основном для обеспечения коррекции и ориентации при длительной эксплуатации КА [2]. За рубежом для компоновки таких ЭРДУ используются в основном ионные двигатели (ИД), в России стационарные плазменные двигатели (СПД). Обычно в ДУ КА их используется от 2 до 8. Как ИД, так и СПД в качестве рабочего тела используют ксенон.

Повышение энерговооруженности КА (4...5 кВт/т), увеличение САС тяжелых телекоммуникационных КА (до 15...20 лет), а также возрастание бортовой энергетики КА (до 20...30 кВт) стимулирует создание новых ЭРД. Цель создания ЭРД повышенной мощности - обеспечение межорбитальных перелетов, включая задачи довыведения КА на рабочую орбиту.



СПД-70 (ОКБ «Факел»)



СПД-100 (ОКБ «Факел»)



ЭРД КМ-45 («Центр Келдыша»)



ЭРД КМ-5 («Центр Келдыша»)

Рис.3. Летные образцы российских СПД

Предварительные конструкторские проработки многоцелевых тяжелых спутниковых платформ массой 3.5...5 тонн и автоматических КА для исследования дальнего космоса позволяют сформулировать требования к ЭРДУ:

- повышение мощности единичного двигателя до уровня 5...7 кВт;
- увеличение удельного импульса до 2500...5000 с для межпланетных КА;
- способность регулирования параметров ЭРД в широком диапазоне по мощности и удельному импульсу;
- снижение угла расходимости ионного пучка для уменьшения его влияния на элементы КА;
- управление вектором тяги для повышения точности и гибкости проведения коррекции КА.

Перспективные ЭРДУ на основе двухрежимных высокоимпульсных ЭРД, мощностью 4...6 кВт с механизмом управления вектором тяги относятся к 3-му рассматриваемому классу ЭРДУ. Это ЭРДУ повышенной мощности. Они предназначены для использования в составе перспективных транспортных модулей, автоматических межпланетных КА и тяжелых многофункциональных спутниковых платформ. К таким платформам относится «Экспресс-4000» разработки ОАО «ИСС им. Решетнева» совместно с Thales Alenia, которая будет оптимизирована для выведения на ГСО и будет подходить для аппаратов, работающих на высокоэллиптических орбитах (масса ~3200 кг., мощность ~ 20 кВт), Как показывают расчеты, выведение КА на ГСО с помощью ЭРДУ с высоким удельным импульсом тяги $J_{уд}$ дает выигрыш по массе КА, выводимого традиционными средствами, до 600 кг [3].

За рубежом для решения перечисленных задач разрабатываются и проходят наземную отработку следующие двигатели: Т6 (Англия), RIT-22 (Германия), NEXT (США), JAXA-35 (Япония). Двигатель ВРТ-4000 компании Aerojet (США) мощностью 4,5 кВт, созданный по технологии российских СПД, успешно прошел летно-космические испытания.

В России также разработаны и проходят наземную отработку аналогичные двигатели повышенной мощности: СПД-140Д (2-х режимный, разработки ОКБ «Факел»), КМ-7 (разработки ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»), Д-90 (2-х режимный, разработки ЦНИИмаш).

Пока наиболее близко к летному образцу из приведенных ЭРД стоит опытный образец СПД-100Д. Однако, в настоящее время при $U_p=800$ В, тяге 180 мН и удельном импульсе $J_{уд}=2750$ с (режим максимального $J_{уд}$) он имеет наработку не более 1000 ч. В режиме максимальной тяги (двигательном режиме) его наработка составляет более 5000 ч.

Из сказанного следует, что доведение ЭРД СПД-140Д (с удельным импульсом тяги 2750 с) до уровня летного образца обеспечит создание ДУ КА для успешного и эффективного решения задач на околоземной орбите в ближайшие 10...15 лет. Для этого необходимо обеспечить необходимый ресурс этого двигателя (в диапазоне 10000...15000 часов). Внешний вид двигателя СПД-140Д показан на рисунке 4.

Для обеспечения дальнейшей конкурентоспособности России при решении задач с удельным импульсом тяги порядка 4000...5000 с и учетом имеющихся заделов целесообразно рассмотреть вопрос продолжения разработки ДАС (на базе модели Д-90 мощностью 5 кВт и удельным импульсом 4000 с). ЭРД Д-90 был разработан в ЦНИИмаш в рамках ОКР «Двигатели-ТМ» и прошел успешные предварительные испытания. Внешний вид инженерной модели двигателя Д-90 представлены на рисунке 5, основные характеристики в таблице 2.

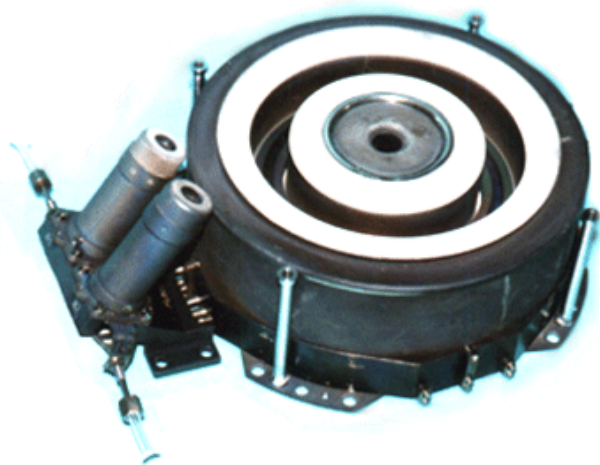


Рис.4. СПД-140Д



Рис.5. Двигатель Д-90

Таблица 2 - Характеристики двигателя Д-90

| Параметр | Режим коррекции (высокий $J_{уд}$) | Маршевый режим (максимальная тяга) |
|----------------------|--|---------------------------------------|
| Мощность, кВт | 5 | 5 |
| Тяга, мН | 160 | 270 |
| Удельный импульс, с | 4000 | 1800 |
| Напряжение 1-ст, В | 75 | - |
| Напряжение 2-ст, В | 1500 | 400 |
| Расход ксенона, мг/с | 4 | 12,4 |

С учетом того, что плотность мощности и тяги ИД возрастает с увеличением удельного импульса в диапазоне его значений 4000...5000 с холловский двигатель типа ДАС, по-видимому, уже не будет иметь значительного преимущества перед ИД. Однако принципиальная схема и конструкция двигателя будут все же проще, чем у ИД. Соответственно, будут проще система его электропитания. Кроме того, в России технология разработки, изготовления и испытаний ДАС освоена.

Все это в совокупности определяет меньшую ожидаемую стоимость ЭРДУ на основе ДАС и целесообразность дальнейшей разработки ДАС в соответствии с задачами рассматриваемого класса ЭРДУ.

Перспективной разработкой в российских ЭРД является создание лабораторных и инженерных моделей СПД нового поколения «АТОН» с высокими (близкими к предельным) рабочими характеристиками [4]. Этот двигатель, как и Д-90, имеет довольно высокий удельный импульс тяги и может быть использован при соответствующей отработке для создания 3-го класса ЭРДУ. Схема инженерной модели АТОН « α -100» и его рабочие характеристики представлены на рисунке 6 и в таблице 3.

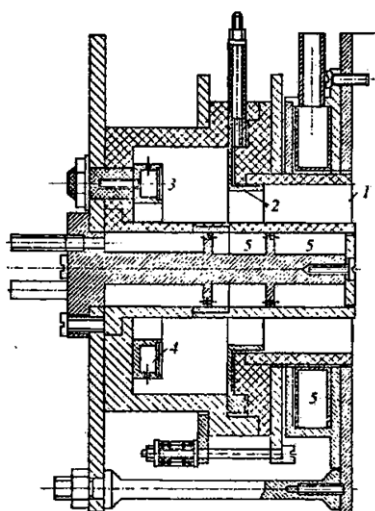


Рис.6. СПД АТОН «α-100»

Таблица 3 – Характеристики СПД АТОН «α-100»

| Параметр | Режим коррекции (высокий $J_{уд}$) | Маршевый режим (максимальная тяга) |
|---------------------|--|---------------------------------------|
| Мощность, кВт | 3 | 2.8 |
| Тяга, мН | 130 | 140 |
| Удельный импульс, с | 3000 | 2600 |
| Напряжение, В | 900 | 300 |
| КПД, % | 65 | 65 |

Для создания ДУ повышенной тяги, использующей электрическую энергию необходимы ЭРД большой мощности [5]:

$$N = \frac{F \cdot J_{уд}}{2 \cdot \eta_T} \quad (1)$$

где: N-мощность ЭРД; η_T -полный тяговый КПД; $J_{уд}$ -удельный импульс; F-тяга ЭРД.

Исходя из данной зависимости тяга ЭРД пропорциональна его электрической мощности N и полному КПД, а обратно пропорциональна удельному импульсу тяги:

$$F = \frac{2 \cdot \eta_T \cdot N}{J_{уд}} \quad (2)$$

Маршевые ЭРДУ с мощностью в несколько десятков киловатт в настоящее время могут быть разработаны на основе ЭРД повышенной мощности (~5 кВт) как в России, так и за рубежом. Однако для создания ЭРДУ более высоких мощностей 100...500 кВт, лучше иметь единичные модули ЭРД большой мощности, порядка 20...50 кВт. Так определяется 3-й класс задач: создание ЭРДУ с ЯЭУ, термоэмиссионным преобразователем энергии, на основе высокоимпульсных холловских ЭРД либо мощных ионных двигателей для многократного межорбитального и лунного транспортного буксира. До уровней электрической мощности порядка 500 кВт, ЯЭУ на основе термоэмиссионного принципа

преобразования энергии имеет уверенное преимущество [5]. При больших мощностях масса термоэмиссионных ЯЭУ будет расти более интенсивно по сравнению с массой динамического (турбомашинного) варианта ЯЭУ.

В настоящее время, как в России, так и за рубежом накоплен уникальный опыт создания и испытаний ЭРД большой мощности, однако практически все данные разработки были выполнены на уровне лабораторных и, в лучшем случае, инженерных моделей. Практического применения эти разработки пока не нашли. Однако в связи с реализацией проектов транспортных энергетических модулей большой мощности к таким ЭРД сейчас проявляется большой интерес.

Параметры наиболее перспективных моделей ЭРД отечественной разработки большой мощности приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Параметры ЭРД повышенной мощности

| Страна/ фирма разработчик | Тип двигателя | Мощность, кВт | Тяга, мН | Удельный импульс, с | Состояние разработки |
|----------------------------------|---------------|------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------|
| Россия/ОКБ «Факел» | СПД-290 (СПД) | 5,0... 30,0 | 1500 | 3300 | Инженерная модель |
| Россия/ ЦНИИмаш | ТМ-50 (ДАС) | 10... 50 | 1000... 1500 | 3000... 7000 | Инженерная модель |
| Россия/ГНЦ «Центр Келдыша» | ИД - ВМ | 32 | - | 7000 | Лабораторная модель |
| Россия/НИИ ПМЭ МАИ | ВЧИД-45 (ИД) | 35 | 850 | 7000 | Проект |

Из таблицы видно, что наиболее близкими к практической реализации являются СПД-290 и ТМ-50. Их статус на сегодняшний день имеет уровень технологической и инженерной модели.

Достигнутые в экспериментальных моделях СПД, работающих на ксеноне, удельные импульсы 3000...3500 с близки к теоретическому пределу (4000...4500 с для СПД при напряжении до 1000 В на ксеноне), что в будущем ограничивает возможности их использования для полетов в дальний космос.

Результаты НИР и имеющийся опыт создания и экспериментальной отработки опытных образцов свидетельствует о том, что в ДАС, благодаря возможности применению двухступенчатой схемы ускорения, вполне возможно достичь значений удельных импульсов 3000...10000 с. К ДАС высокой мощности относится ТМ-50. Это двухступенчатая модель, которая отработывалась на режимах: 25 кВт-номинальный рабочий режим; 35 кВт-форсированный режим; 50 кВт-предельный кратковременный режим.

Холловские ЭРД большой мощности представлены на рисунках 7 и 8.

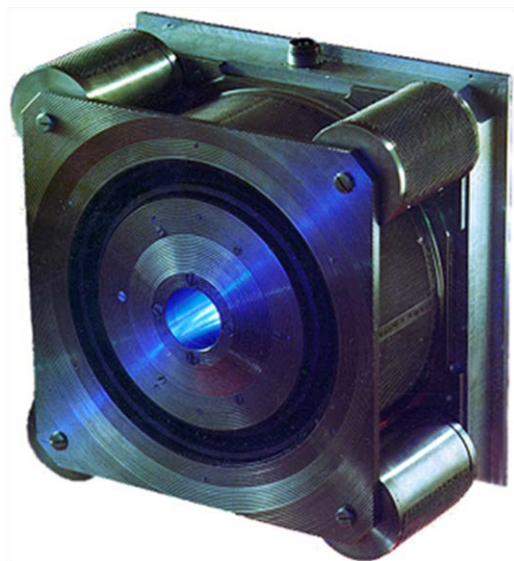


Рис.7. Двигатель ТМ-50

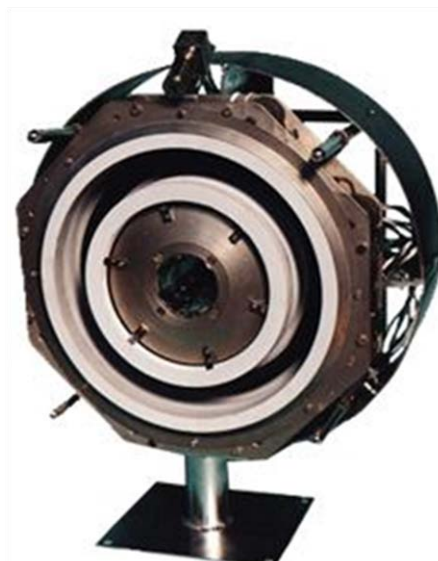
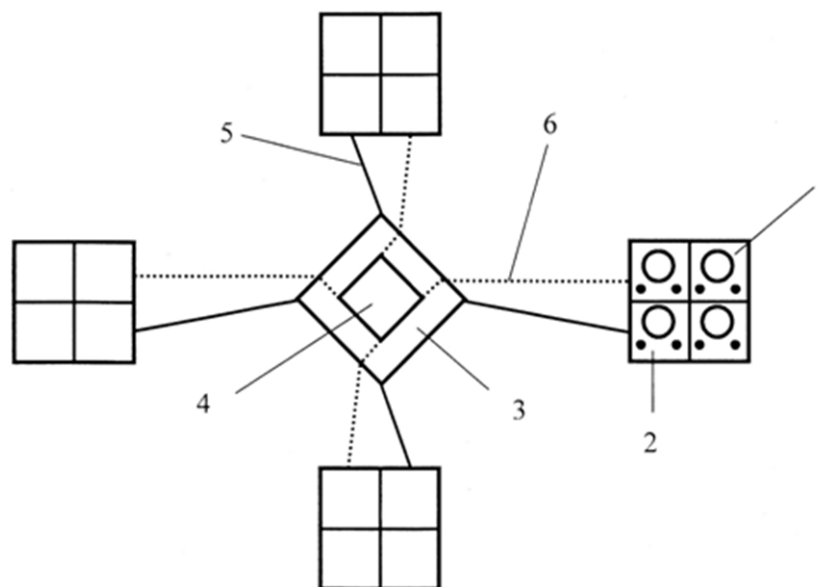


Рис.8. Двигатель СПД-290

Из проведенного анализа [7] можно заключить, что как с точки зрения компоновки при минимальной массе, так и с точки зрения минимального времени запуска и удобства управления, при использовании ЭРД в 25 кВт оптимальной будет ЭРДУ мощностью не более 300 кВт. Конструкция такой ЭРДУ может включать 16 двигательных модулей по 25 кВт на 4-х штангах, из которых 12 модулей рабочих и 4 в «холодном» резерве. Условная схема компоновки для 300 киловаттной ЭРДУ показана на рисунке 9.

Следует заметить, что в качестве перспективной ЭРДУ большой мощности в Европе признана ЭРДУ мощностью именно 300 кВт [8].



1 - рабочий двигательный модуль; 2 - резервный двигательный модуль; 3 - система хранения и подачи ксенона; 4 - блок коммутации высоковольтных цепей; 5 - газовая магистраль; 6 - бортовая кабельная сеть

Рис.9. Схема компоновки 300 киловаттной ЭРДУ

Для реализации проекта создания транспортно-энергетического модуля с ЯЭУ и турбомашинным преобразователем энергии мегаваттного класса ведутся активные работы по созданию соответствующей ЭРДУ.

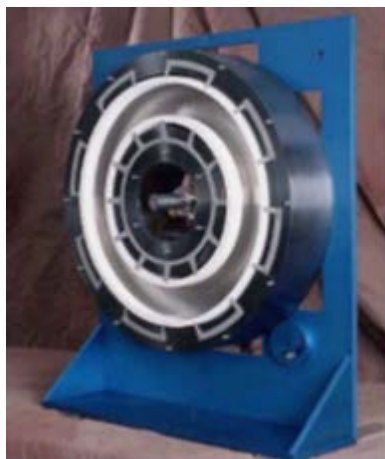
Анализ возможностей применения в такой ЭРДУ ЭРД мощностью около 25 кВт показывает, что практическая реализация таких многодвигательных систем невозможна.

Для создания ЭРДУ мощностью 1000 кВт необходимы более мощные одиночные двигатели и двигательные модули (ДМ) на их основе. Компоновка ЭРДУ мегаваттного класса, аналогично приведенной на рисунке 9, может производиться из ДМ мощностью $80 \div 100$ кВт. Холловских или ионных двигателей, удовлетворяющих таким требованиям, ни в России, ни за рубежом пока не создано, даже на уровне лабораторных моделей.

Инженерные модели холловских ЭРД мощностью до 50 кВт в настоящее время созданы и прошли проверку на функционирование. В России это - двухступенчатый двигатель с анодным слоем (ДАС) типа ТМ-50 разработки ЦНИИмаш, в США это СПД типа NASA-457M. Согласно [8] в 2002 году проведены первые успешные испытания двигателя NASA-457M мощностью 73 кВт и тягой 3 Н на ксеноне (режим 1). Впоследствии были проведены испытания данного двигателя на ксеноне и аргоне, а мощность была повышена до 96 кВт (режим 2). Данный показатель (по мощности единичного двигателя холловского типа, работающего на инертном газе) является уникальным, так как мощность ближайших

прототипов, разработанных в США и в России, ограничивалась уровнем 30...50 кВт в единичном двигателе.

Внешний вид и основные параметры холловского двигателя NASA-457M, полученные в ходе данных испытаний представлены на рисунке 10.



| Параметр | Режим 1 | Режим 2 |
|-------------------------|---------|---------|
| Мощность, кВт | 73 | 96 |
| Удельный импульс, с | 3047 | 3250 |
| Разрядное напряжение, В | 650 | 800 |
| Расход ксенона, мг/с | 93 | 111 |
| Тяга, мН | 2950 | 3527 |
| Тяговый КПД, | 0,63 | 0,65 |
| Наружный диаметр, см | 45,7 | |

Рис.10. Двигатель NASA-457M и его основные характеристики

Это пока единственные два типа двигателей, которые по уровню разработки и техническим требованиям могут претендовать на создание ЭРДУ мегаваттного класса.

В настоящий момент уровень мощности 50 кВт для холловских двигателей можно считать достигнутым. Повышение мощности единичных двигателей не имеет очевидных физических препятствий, однако возникают препятствия технологического характера, а также проблемы, связанные с экспериментальной отработкой.

Основной проблемой технологического характера является в случае с СПД изготовление керамических колец достаточно большого диаметра. Исследования по использованию составных элементов конструкции до сих пор не проводились. В случае с ДАС подобной проблемы не существует.

При экспериментальной отработке холловских двигателей большой мощности (порядка 100 кВт), потребные скорости откачки составляют более 300000 л/с. Также потребуются вакуумные камеры больших размеров, порядка 12 м в диаметре и более 20 м длины. Самая большая в России камера, предназначенная для испытаний ЭРД, «КВУ-90», находится в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» (диаметр – 3.2 м, длина – 8 м) и согласно оценкам может быть применена для испытаний холловских двигателей мощностью не более 10...15 кВт. При дооснащении камеры дополнительными системами, возможно организовать испытания холловских ЭРД до 25 кВт и ионных до 35 кВт.

Для создания сверхмощной маршевой ЭРДУ мегаваттного класса в настоящее время кроме холловских ЭРД рассматриваются ИД, магнитоплазодинамические (МПД), а также двигатели новых типов, в том числе VASIMR.

В настоящее время наибольшие интенсивные исследования в области ИД большой мощности ведутся для двух типов: на основе разряда постоянного тока (технология США) и на основе ВЧ-разряда (технология Германии). В России, в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» ведутся проектные и исследовательские работы по созданию ИД на основе разряда постоянного тока мощностью до 32 кВт (ИД ВМ). В НИИ ПМЭ МАИ разработан проект и ведется проработка вопросов изготовления и подготовка экспериментальной базы для испытаний ВЧИД-45 мощностью 35 кВт.

Эти два типа ИД в России являются также основными претендентами на создание ЭРДУ мегаваттного класса. Следует заметить, что для создания ИД большой мощности (более 20 кВт), физических препятствий нет. Однако, следует учитывать, что повышение мощности ИД возможно лишь путем увеличения площади ионно-оптической системы (ИОС). Так, например, если использовать ионно-оптическую систему (ИОС), отработанную на двигателе NEXIS, то повышение мощности двигателя до 100 кВт приведет к увеличению рабочего диаметра сетки более чем до 1.2 м.

Создание столь больших ИОС, как и газоразрядных камер (ГРК), связано со значительными технологическими сложностями. Дело не только в обеспечении необходимой точности изготовления, но и в обеспечении требуемых тепловых режимов, однородности плазмы в ГРК и прочностных характеристик ионной оптики. Решение задач изготовления и отработки столь больших ИОС является сложной инженерной и технологической задачей. Основные проблемы связаны с наличием экстремальных тепловых режимов конструкции, тепловыми деформациями электродов ИОС при работе двигателя, необходимостью обеспечения достаточных прочностных и жесткостных характеристик. За рубежом ведутся исследования по применению сеток ИОС из углеволокна. Однако для ИОС диаметром более 1 м технология пока не отработана. Неоднородность плазмы в ГРК может привести к нерасчетным режимам работы ИОС и выходу из строя двигателя. Обеспечение прочностных характеристик ИОС из-за существенных вибрационных и ударных нагрузок, которым подвергается КА на этапах выведения и эксплуатации, также является сложной инженерной задачей.

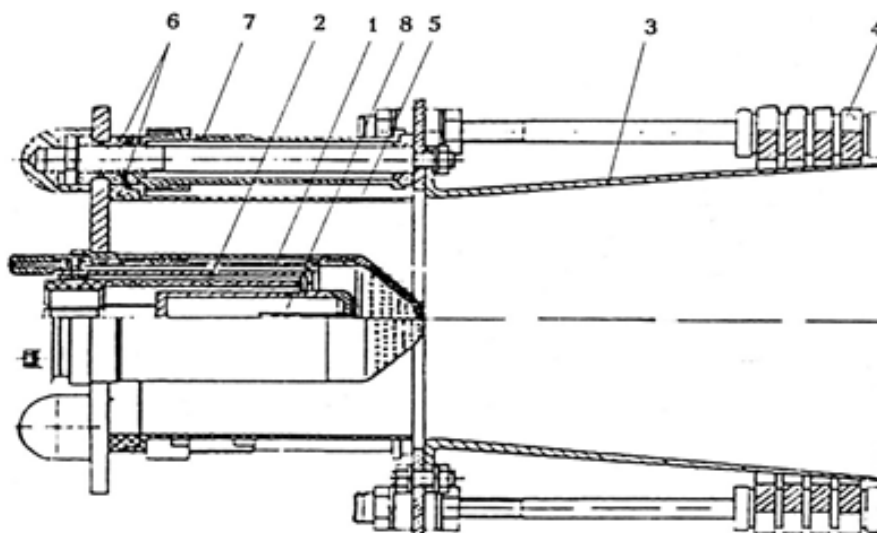
Повышение разрядного напряжения в традиционной ИОС приводит к падению плотности тока. Соответственно приходится либо снижать плотность тока в ГРК, либо увеличивать размер ИОС. Снижение плотности тока, а соответственно снижение плотности

плазмы в ГРК также имеет свои проблемы, связанные с необходимостью поддержания устойчивого горения разряда, а также обеспечения однородности плотности плазмы по диаметру ИОС.

Несмотря на более низкий в сравнении с холловскими двигателями расход рабочего вещества, требования к динамическому вакууму при испытаниях ИД на порядок выше. Требования к размерам вакуумной камеры также остаются высокими. Из-за высоких энергий ионного пучка необходимо создание эффективных мишеней, позволяющих принять ионный пучок с энергией в десятки киловатт и избежать загрязнений конструкции ИД и криопанелей продуктами распыления. От эффективности решения данной проблемы зависят геометрические размеры вакуумной камеры, требуемой для проведения испытаний. Таким образом, из-за большого количества проблем, связанных с разработкой и испытаниями ИД большой мощности, пока еще не созданы модели ИД мощностью 50 кВт не говоря уже о мощностях в 100 кВт, несмотря на высокий $6000 \dots 10000$ с удельный импульс.

Создание современных ИД в России, в особенности большой мощности, требует решения достаточно сложных задач: создание высоковольтной и сильноточной элементной базы для разработки и изготовления системы электропитания и управления, создания современных испытательных стендов с мощной системой откачки, обеспечивающей высокий динамический вакуум и другие технические и технологические проблемы.

В некоторых работах при создании ЭРДУ для полета к Марсу предлагается использовать МПД мощностью порядка $100 \dots 200$ кВт [9]. В 70-х годах в России в ОАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королева» проводились работы по исследованию МПД с литием в качестве рабочего тела. Их мощность составляла 500 кВт, а наработка в стендовых условиях порядка 500 часов [10]. Конструктивная схема торцевого сильноточного двигателя (ТСД) на литии, с номинальной мощностью 500 кВт, представлена на рисунке 11.



1 – катод-испаритель; 2 – предварительный нагреватель; 3 – анод; 4 - управляющий соленоид; 5 – нейтральный экран; 6 – изолятор; 7 – крепёжный элемент; 8 – ампула с присадкой-активатором

Рис.11. Конструктивная схема ТСД разработки РКК «Энергия» с номинальной мощностью 500 кВт

Одной из последних разработок, уже в российский период можно назвать разработку лабораторной модели одной из модификаций МПД с внешним магнитным полем – торцевого холловского двигателя (ТХД) в НИИ ПМЭ МАИ, которая была способна работать при мощности до 200 кВт, со значением удельного импульса тяги более 4000 с и тяговым КПД выше 40 % [11].

Однако, несмотря на достаточно высокие характеристики МПД двигателей, возобновление работ с данными моделями представляет значительные трудности. Отработка МПД двигателей на литии, кроме решения физических и технологических задач по элементам конструкции двигателя, требует создания сложных и дорогостоящих стендовых комплексов для его испытаний, включающих кроме обычных вакуумных камер дополнительные сложные системы. Это, прежде всего, система хранения, подачи жидкометаллического лития и его испарения. Система торможения и конденсации плазменного потока и другие системы. Помимо этого до сих пор остается нерешенной проблема осаждения в полете на элементах конструкции КА легко конденсирующихся рабочих веществ, таких как литий.

Данный тип ЭРД в настоящее время характеризуется наименьшей степенью проработки и технологической готовности. Для МПД двигателей характерны большие значения тока (несколько тысяч ампер), использование токсичных конденсирующихся

рабочих тел, большая теплонапряженность конструкции (и, как следствие, малый продемонстрированный ресурс), относительно низкие показатели эффективности и т.д.

Все это пока сдерживает практическое применение МПД двигателей в ДУ КА, хотя основные параметры, продемонстрированные в ходе наземных экспериментальных работ (мощность единичного двигателя до 500 кВт и выше, значение удельного импульса от 2000 с до 5500 с, высокая плотность тяги и т.д.), указывают на значительный потенциал данной технологии.

Опубликованной до настоящего времени информации по проведенным экспериментальным работам по МПД двигателям недостаточно для составления полного представления о тяговых, массогабаритных и особенно ресурсных характеристиках, которые могли бы иметь магнитоплазменные двигатели при доведении уровня их разработки до квалификации, превышающей уровень лабораторных моделей.

Использование ЭРД типа МПД требует проведения дополнительных исследований для решения перечисленных проблем и созданию образцов с подтвержденным ресурсом свыше 10 000 часов. После этого возможно сделать вывод о целесообразности применения данного типа ЭРД, например, для исследования дальнего космоса или обеспечения пилотируемой экспедиции на Марс.

Заключение

Рассмотрев основные 5 классов ЭРДУ в зависимости от решаемых задач, а также используемых в них типов ЭРД можно сделать следующие выводы:

1. Вопросы обеспечения современных и перспективных МКА в основном решены. Имеются ряд двигателей (СПД и АИПД), проработанных до стадии летных образцов. Дальнейшие работы ведутся в направлении увеличения их эффективности, поскольку известно, что при уменьшении масштабов ЭРД их КПД значительно снижается.
2. Создание ЭРДУ малой и средней мощности должно базироваться на ЭРД мощностью 1..2 кВт, по которым имеется существенный задел, отработанных до уровней летных образцов. В России для оснащения КА ЭРДУ малой и средней мощности могут использоваться холловские двигатели типа СДП-100В, СПД-100Д, КМ-5, СПД МАГ-3, Д-55, Д-60. Для этих двигателей можно использовать унифицированные системы (СЭУ, СХП, СПУ, бортовой вычислительный комплекс). Разработка СПД-100Д с удельным импульсом 2750 с, СПД МАГ-3 с удельным импульсом 3600 с, Д-60, Д-80 с удельным импульсом 3600 с и достаточно большим ресурсом обеспечит России

конкурентоспособность и возможность успешного и эффективного решения задач рассматриваемого класса.

3. За рубежом ведутся работы по созданию ЭРДУ повышенной мощности (несколько десятков кВт) для ДУ тяжелых КА (3...5 т). В основном – это ионные двигатели, такие, как NEXТ (США), RIT-22 (Германия), Т-6 (Англия), JАХА-35 (Япония). Мощность этих ЭРД 4.5...6 кВт, удельный импульс 5000...6000 с.

Для обеспечения конкурентоспособности Российских КА и использования имеющихся заделов предлагается в ближайшей перспективе (до 2020 года) сосредоточить усилия на создании ЭРДУ на базе двухрежимных двигателей типа СПД-140Д, Д-90 и КМ-7, мощностью 4.5...5 кВт, с регулируемым вектором тяги и удельным импульсом 3000...4000 с. Двигательные установки на основе этих ЭРД позволят создать тяжелые спутниковой платформы. Удельный импульс у этих двигателей меньше, чем у ИД, но существенно более простая конструкция самого двигателя и СПУ делают этот тип двигателей перспективным для использования. С учетом уровня технологической проработки двигателей СПД и ДАС в России они составят конкуренцию зарубежным ИД аналогичного класса. Все это в совокупности определяет и меньшую ожидаемую стоимость ЭРДУ на базе СПД и ДАС.

4. Для создания ЭРДУ большой мощности (100...500 кВт) необходимы одиночные двигатели мощностью 20...30 кВт и ЯЭУ в качестве первичного источника энергии. ДУ такой размерности смогут оснащаться многоразовые межорбитальные и лунные буксиры.

Для уровней мощности ЯЭУ до 500 кВт возможно применение термоэмиссионного способа преобразования тепловой энергии в электрическую. В качестве перспективных двигателей большой мощности целесообразно использование ЭРД типа СПД или ДАС, которые проще, эффективней и дешевле ионных.

В качестве маршевых ЭРДУ больших мощностей возможно использование холловских двигателей типа СПД-290 или ТМ-50. Технический уровень проработки этих двигателей может в кратчайшие сроки обеспечить создание опытного и, в перспективе, летного образца. В связи с этим, создание ЭРДУ мощностью порядка 300 кВт для межорбитального и лунного буксира в ближайшие 15...20 лет является реальным.

5. Для создания маршевых сверхмощных ЭРДУ (мегаваттного уровня) в настоящее время готовых двигателей нет. Для комплектации таких ЭРДУ пригодны лишь вновь разрабатываемые СПД и ИД мощностью 50...100 кВт. Это в основном либо первые лабораторные модели, либо проекты.

В России реальными претендентами в создании ЭРДУ сверхбольшой мощности являются холловские (СПД, ДАС) двигатели мощностью 50...100 кВт и МПД-двигатели

мощностью 200 кВт на газообразных рабочих веществах. Существующие в России проектные разработки ионных двигателей постоянного тока на 32 кВт и ионных двигателей с ВЧ-разрядом на 35 кВт также могут претендовать на участие в создании сверхмощных ЭРДУ, поскольку достоинством ИД является возможность получения больших удельных импульсов тяги и большого ресурса.

Библиографический список

1. Макриденко Л.А., Волков С.Н., Ходненко В.П., Золотой С.А. Концептуальные вопросы создания и применения малых космических аппаратов//Вопросы электромеханики.-Т. 114. 2010.-С.15-26.
2. Козубский К.Н., Мурашко В.Н., Рылов Ю.П. и др. СПД работают в космосе//Физика плазмы.-№3, Том 29. 2003.-С.277-292.
3. Афанасьев И.Б. “Экспресс-4000”: Создание российско-французской платформы// Новости космонавтики - №2. Том 18. 2008 - с.54.
4. Морозов А.И., Бугрова А.И., Десятков А.В. и др. Стационарный плазменный ускоритель –двигатель АТОН//Физика плазмы.-№7, Том 23. 1997.-С.635-645.
5. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов/О.А. Горшков, В.А. Муравлев, А.А. Шагайда; под ред. академика РАН А.С. Коротева. М.: Машиностроение, 2008. 280 с.
6. Волчков Г.В., Выставкин А.Г. Космическая ядерная энергетическая установка с паротурбинным преобразованием энергии//Электронный журнал «Труды МАИ» - Вып №45. 2011.
7. Пильников А.В. Некоторые проблемные вопросы создания в России электроракетной двигательной установки большой мощности//Вестник МАИ.-№3, Том18. 2011.- С.97-103.
8. D. Manzella, R. Jankovsky, R. Hofer. Laboratory model 50-kW Hall Thruster-paper AIAA 2002-3676, 38 th Joint Propulsion Conference &Exnibit, 7-10 July, 2002, Indianapolis, Indiana, USA.
9. Кубарев Ю.В. Полеты на Марс, электрореактивные двигатели настоящего и будущего//Наука и технологии в промышленности.-№2. 2006.-С.19-35.
10. Агеев В.П., Островский В.Г. Магнитоплазменный двигатель большой мощности непрерывного действия на литии//Известия Российской академии наук. Энергетика.-№3. 2007.
11. V.B. Tikhonov, S.A. Semenikhin, J.E. Polk. Own magneticfield impact on MPD thrusters performance with external magnetic field-Proceedings of the 26th International Electric

Propulsion Conference, Kitakyushu, 1999, p.p. 1017-1023.

Сведения об авторах

ГУСЕВ Юрий Геннадьевич, начальник отделения ФГУП Центрального научно-исследовательского института машиностроения.

тел.: 8(916)141-16-24; e-mail: uggusev@mail.ru.

ПИЛЬНИКОВ Александр Васильевич, ведущий научный сотрудник ФГУП Центрального научно-исследовательского института машиностроения, к.т.н.

тел.: 8(916)559-62-39; e-mail: Dante1555@yandex.ru