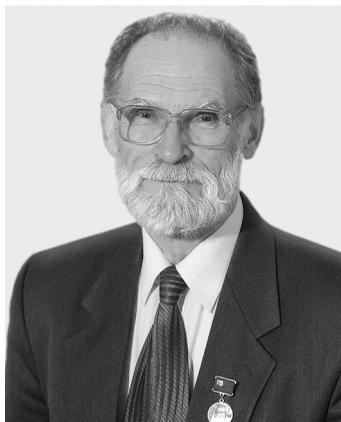


## Ядерная энергетика в околоземном космосе

В.В. СИНЯВСКИЙ,  
доктор технических наук  
Ракетно-космическая корпорация “Энергия”  
им. С.П. Королёва

---

**В статье рассмотрены результаты проектных и концептуальных разработок РКК “Энергия” ядерных энергетических и электроракетных двигательных установок мощностью до 15 МВт для перспективных космических**



**аппаратов и комплексов нового поколения. Они способны эффективно решать широкий спектр задач в околоземном космосе и при организации лунных баз, а также в межпланетных экспедициях\*.**

### ИСТОКИ КОСМИЧЕСКОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Успешное развитие космонавтики в XXI в. зависит от прогресса наукоемких технологий и создания новых высокоэнергетических систем. На быстрорастущем рынке космических услуг будут востребованы ядерная энергетика, наиболее

энергоёмкие электроракетные двигательные установки для космических аппаратов.

Космическая ядерно-энергетическая установка (ЯЭУ) представляет собой атомную электростанцию, спроектированную для эксплуатации в условиях космоса, важ-

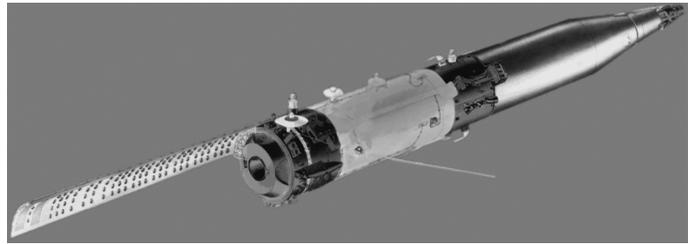
нейшими из которых считаются:

– отсутствие атмосферы, что позволяет для защиты оборудования от излучения ядерного реактора использовать не круговую, как в условиях Земли, а теневую радиационную защиту существенно меньшей массы;

---

\* В.П. Легостаев, В.А. Лопота, В.В. Синявский. Перспективы и эффективность применения космических ядерно-энергетических установок и ядерных электроракетных двигательных установок. Космическая техника и технологии, 2013, № 1, с. 4–16.

*Советский космический аппарат "УС-А" с ЯЭУ "Бук" мощностью около 3 кВт. Периодически запускался в космос в 1970–1987 гг.*



– возможность отвода не преобразованного в термодинамическом цикле тепла лишь излучением, что приводит к необходимости иметь в составе ЯЭУ холодильник-излучатель достаточно большой площади;

– невесомость, что позволяет разворачивать в космосе достаточно легкие и большие по площади конструкции.

Электроракетный двигатель – новый тип используемого в космосе двигателя, в котором тяга создается потоком плазмы или ионов, ускоренным электрическим или электромагнитным полем. Источником энергии такого двигателя будет солнечное или ядерное излучение. Основное преимущество электроракетного двигателя перед традиционным химическим – высокое значение удельного импульса  $F_{уд} = F/G$ , где  $F$  – тяга,  $G$  – расход рабочего тела. Удельный импульс ЖРД – 3–4,5 км/с, электроракетный двигатель будет развивать удельный импульс в межпланетном пространстве – 40–60 км/с. Это сокращает количество

рабочего тела (топлива) для выполнения задачи полета и, следовательно, позволяет значительно увеличить массу полезной нагрузки. Плата за это – малая тяга, существенно ниже силы тяжести у поверхности Земли, поэтому электроракетные двигательные установки могут использоваться только в космическом пространстве.

Космические ядерно-электроракетные двигательные установки (ЯЭРДУ) могут быть использованы:

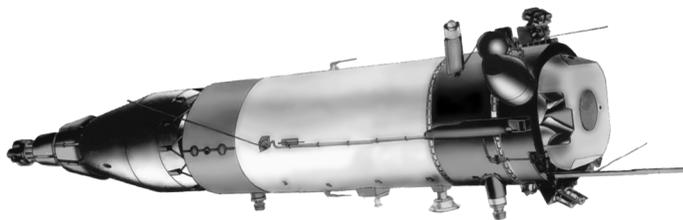
– в качестве источника электроэнергии на энергоемких космических аппаратах;

– в составе перспективных космических транспортных средств, в том числе многообразных, на основе электроракетной двигательной установки, питаемых бортовой ЯЭУ;

– в транспортно-энергетическом модуле для доставки тяжелых аппаратов на рабочие орбиты и последующее длительное энергоснабжение их аппаратуры.

Наша страна пока еще мировой лидер в области космической ядерной

энергетики. У специалистов ряда предприятий атомной (ОАО "Красная Звезда", Физико-энергетический институт) и ракетно-космической (КБ "Арсенал") отраслей есть опыт создания, испытаний и эксплуатации на околоземной орбите космических аппаратов с ядерным источником электроэнергии. В 1970–1988 гг. успешно эксплуатировались ИСЗ "УС-А" морской разведки с термоэлектрической ЯЭУ "Бук" мощностью до 3 кВт. Космический аппарат "УС-А" разработан и изготовлен в НПО машиностроения и КБ "Арсенал". В 1987–1988 гг. прошли летные испытания КА "Плазма-А" ("Космос-1818 и -1876") с термоэмиссионной ЯЭУ "Топаз" мощностью 5 кВт, во время которых впервые было осуществлено питание электроракетных двигателей от ядерного источника энергии. К началу 1990-х гг. в НИЦ "Курчатовский институт" был выполнен комплекс наземных ядерно-энергетических испытаний ЯЭУ "Енисей" с термоэмиссионным реактором-преобразователем мощностью



*Советский экспериментальный космический аппарат "Плазма-А" с термоэмиссионной ЯЭУ "Топаз" мощностью 5 кВт. 1987–1988 гг.*

5 кВт, которая разрабатывалась для геостационарного ИСЗ "Эстафета". К настоящему времени на основе этих технологий в ОАО "Красная Звезда" разработаны проекты термоэмиссионных ЯЭУ мощностью от 25 до 100 кВт.

В конце 1950-х гг. при поддержке С.П. Королева в РКК "Энергия" (тогда ОКБ-1) одновременно с разработкой межпланетного экспедиционного корабля (Земля и Вселенная, 2007, № 2) начались исследования по созданию для него термоэмиссионной ЯЭУ мощностью 2,2–15 МВт в виде трех блоков по 5 МВт. В 1960-е гг. в рам-

ках эскизных проектов сверхтяжелых ракет-носителей Н-1 и Н-1М были разработаны проекты двигательных установок мегаваттной мощности. Рассматривался магнитоплазодинамический двигатель электрической мощностью 500 кВт с литием в качестве рабочего тела, удельным импульсом 55 км/с, КПД 0,55, тягой 8,3 кгс. В конце 1970-х гг. такой двигатель был создан и испытан в РКК "Энергия".

В 1970–1980-е гг. в РКК "Энергия" в кооперации с предприятиями атомной и космической отраслей разработаны проекты ядерных электроракетных двигательных уста-

новок – с термоэмиссионной ЯЭУ мощностью несколько сот киловатт и холловскими плазменными двигателями мощностью десятки киловатт для межорбитального буксира "Геркулес". Проектные параметры буксира следующие: электрическая мощность ЯЭУ – 550 кВт, удельный импульс двигательной установки – 30 км/с, тяга двигателя – 2,6 кгс, ресурс – 16 тыс. ч, рабочее тело – ксенон, масса буксира – 14,5–15,7 т, в том числе ЯЭУ – 6,9 т.

В октябре 2009 г. на заседании Комиссии при Президенте РФ по модернизации и технологическому развитию экономики России был официально утвержден новый проект "Создание транспортно-энергетического модуля на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса". Главными разработчиками



*Проектный облик космического аппарата с термоэмиссионной ЯЭУ второго поколения. Разработка КБ "Арсенал". 1990-е гг.*

Испытания в вакуумной камере магнитоплазменного электроракетного двигателя мощностью 500 кВт, рабочее тело – литий, удельный импульс – 55 км/с, КПД – 0,55, ресурс – почти 500 ч. 1970-е гг.



назначены ОАО «НИКИЭТ» (реактор) и ГНЦ «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша» (ЯЭУ с газотурбинной схемой преобразования энергии и ионные электроракетные двигатели). Ис-

следовательский центр разработки транспортно-энергетического модуля также ответственным за в целом.

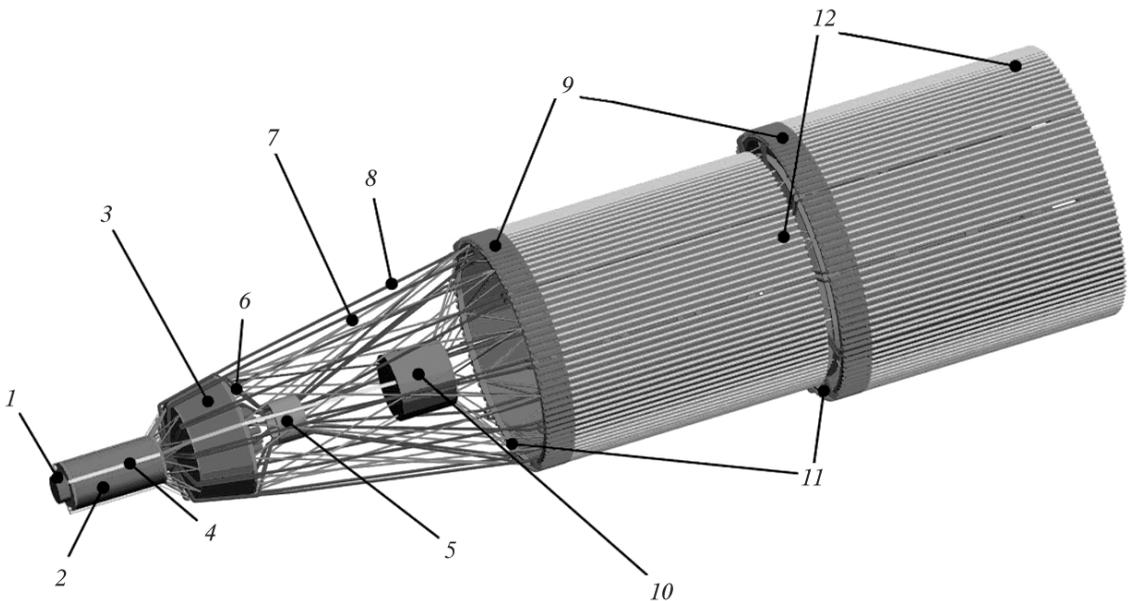
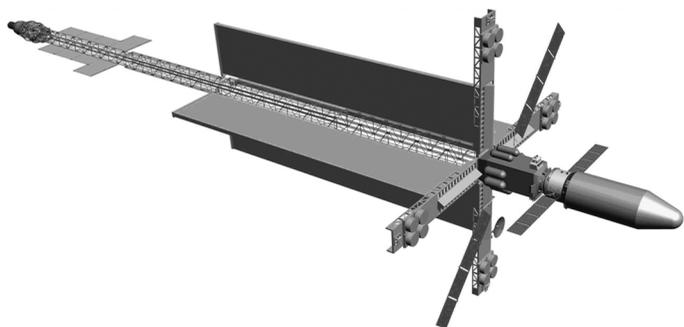


Схема термоэмиссионной ЯЭУ для межорбитального буксира «Геркулес»: 1 – блок генераторов пара цезия и системы удаления газообразных продуктов деления модулей; 2 – ТРП модульной схемы; 3 – многослойная радиационная защита; 4 – силовочная шина; 5 – многоканальный МГД-насос с общей магнитной системой всех модулей; 6 – трубопровод литиевой системы охлаждения на входе в модуль термоэмиссионного реактора-преобразователя; 7 – опорная ферма; 8 – трубопровод литиевой системы охлаждения на выходе из модуля термоэмиссионного реактора-преобразователя; 9 – теплообменник литий – натрий зоны испарения тепловой трубы; 10 – силовой преобразовательный блок; 11 – опорное кольцо (раздвижная ферма полезной нагрузки не показана); 12 – зона конденсации тепловых труб холодильника-излучателя. Проект конца 1980-х гг.



*Транспортно-энергетический модуль мегаваттной мощности на основе ЯЭУ с газотурбинной установкой и капельным холодильником-излучателем.*

---

Перечень задач определяет диапазон электрических мощностей ЯЭУ, требуемый ресурс в ряде случаев накладывает ограничение на удельную массу установки (отношение массы ЯЭУ к ее электрической мощности). При выборе облика ЯЭУ и двигательной установки должны учитываться такие характеристики: удельная масса, габариты, ресурс, надежность, степень технической готовности, стоимость и сроки разработки, потенциал развития, возможность повторного запуска и регулирования мощности, параметры тока, совместимость ЯЭУ с различными типами двигателей.

#### ТЯЖЕЛЫЕ АППАРАТЫ ГЛОБАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

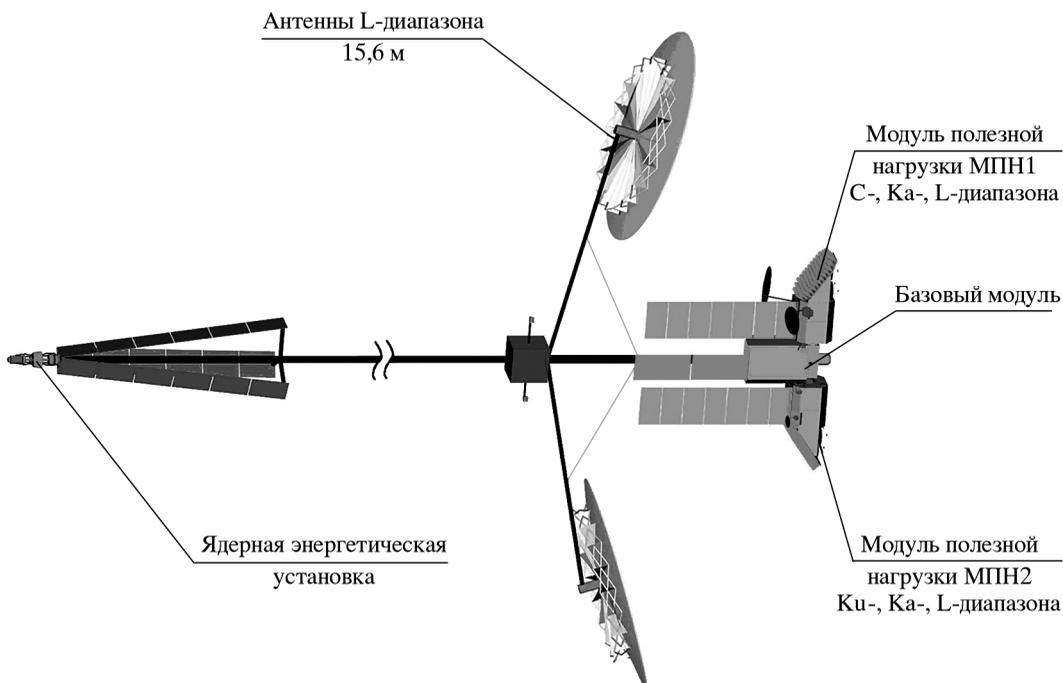
В начале 2000-х гг. в РКК “Энергия” были выполнены исследования и проектные разработки системы глобальной космической связи, которая могла бы экономически конкурировать с дешевой

сотовой связью. Целесообразность ее создания связана с практически заполненной геостационарной орбитой работающими и пассивными ИСЗ, а также с исчерпанием частотного ресурса. При этом учитывался положительный опыт создания и коммерческого использования геостационарных спутников серии “Ямал”, при создании платформы которых новые технические решения составили 95%, что позволило им стать конкурентными на мировом рынке космических услуг. С учетом быстрого морального старения функциональной аппаратуры таких аппаратов предполагалась замена модулей с технологическим связным оборудованием или всего аппарата примерно через каждые семь лет. Это потребовало ввести несколько этапов создания системы из трех-четырех тяжелых геостационарных многофункциональных аппаратов с наращиванием потребляемой ими электрической мощ-

ности. Были выполнены проекты таких ИСЗ с солнечными батареями мощностью 30–80 кВт. На следующем этапе планировалось использовать в качестве источника электроэнергии двухрежимную термоэмиссионно-термоэлектрическую ЯЭУ мощностью 400 кВт с ресурсом до года для доставки базового модуля на геостационарную орбиту, 150–180 кВт в режиме длительного функционирования (не менее 10–15 лет) для электрообеспечения аппаратуры ИСЗ связи массой до 20 т.

#### КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

Одна из актуальных прикладных задач ядерной энергетики, в том числе с большим коммерческим потенциалом, – обеспечение всепогодного круглосуточного оперативного радиолокационного наблюдения с высоким разрешением обширных районов земной поверхности. При этом область применения радиолокационных методов зондирования будет неуклонно расширяться, что обусловлено такими их уникальными свойствами, как:



*Проект тяжелого геостационарного спутника глобальной системы связи с ЯЭУ мощностью 180 кВт. Разработка РКК "Энергия". Начало 2000-х гг.*

- мониторинг независимо от погодных условий;
- чувствительность к неровностям поверхности (рельеф местности, конфигурация растительного покрова, океанические волны);
- чувствительность к содержанию воды в сельскохозяйственных культурах, почвах, льдах;
- возможность осуществлять подповерхностное зондирование (поиск линз грунтовых вод, обнаружение оча-

гов подземных пожаров, определение профилей влажности почв).

Основное преимущество радиолокационного метода по сравнению с оптическим – независимость от метеоусловий и освещенности, что важно при достижении различных оперативных целей. Впервые ЯЭУ применили на советском низкоорбитальном радиолокационном ИСЗ "УС-А". В настоящее время ряд социально-экономических, научных и коммерческих задач также могут быть решены только в условиях оперативного получения информации, и радиолокационные системы с мощной бортовой энергетикой могут стать единственно приемлемыми для их решения.

Разработка радиолокаторов с синтезированной апертурой позволяет получать радиолокационные изображения с высоким разрешением при использовании антенн относительно небольших размеров. С помощью космических средств это может обеспечить решение следующих задач:

- наблюдение районов с контролем строительства сооружений, состояния дорог и магистралей, перемещения транспорта;
- наблюдение за надводной обстановкой в морских акваториях, включая районы аварий, чрезвычайных ситуаций и незаконного лова рыбы; обнаружение и распознавание надводных кораблей;

– оперативное картографирование труднодоступных районов; уточнение и обновление топографических карт.

Среди научных, социально-экономических и коммерческих задач, эффективно решаемых с применением радиолокаторов с синтезированной апертурой, можно выделить:

– картографирование районов в интересах геологии, экологии, сельского и лесного хозяйства, землепользования, архитектуры, дорожного строительства;

– наблюдение районов стихийных бедствий, экологических катастроф, террористических актов;

– контроль ледовой обстановки в интересах судовождения;

– исследование океанических процессов, влияющих на жизнедеятельность человека (приливы, цунами, штормы, загрязнения);

– контроль зон рыболовства;

– контроль нефти и газопроводов, линий электропередач, оросительных каналов с целью выявления мест аварий, повреждений, несанкционированного подключения.

Следует отметить, что космический радиолокатор с фазированной решеткой – достаточно гибкая система, так как легко перестраивается электронным управлением отдельных ячеек. Легкость перестраивания системы позволяет часть

ее ресурсов (на коммерческой основе, на основе международных или межгосударственных соглашений) передать другим государствам. При необходимости такая система может быть встроена в международные системы коллективной безопасности, борьбы с терроризмом и незаконным оборотом наркотических средств. Кроме очевидных политических и социальных преимуществ такая система может дать ощутимую экономическую выгоду за счет продажи части ресурсов радиолокационной станции отдельным государствам или международным организациям. При этом будет осуществляться экспорт не сырья, а дорогой высокотехнологической продукции.

Платформа с ЯЭУ электрической мощностью от 50 до 500 кВт в составе высокоорбитального многофункционального КА с мощным радиолокатором на борту удовлетворяет современным требованиям к таким системам.

#### ОЧИСТКА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ

Одной из задач использования многоугольного ядерного электроракетного буксира может быть решение проблемы очистки от нефункционирующих спутников. Назрела необходимость удаления отработавших аппаратов, прежде всего с геостационарной ор-

биты, учитывая дефицитность и дороговизну (20–50 млн долларов) точек, где могут быть расположены новые телекоммуникационные ИСЗ. На основе флота из двух десятков многоугольных буксиров электрической мощностью 150–200 кВт может быть создана система очистки от крупных объектов размером 2–3 м и средней массой 2,5 т, которых сейчас насчитывается более 1200. Это представляется выгодной коммерческой задачей. Оценки показывают, что затраты на очистку космоса от “мусора” могут достичь около 3 млрд долларов в год.

Предложено задействовать три модификации такого буксира. **Многоугольный аппарат-трактор** эксплуатируется на геостационарной орбите и предназначен для сбора пассивных аппаратов. Этот буксир оснащен оборудованием для обнаружения, захвата, установки и крепления пассивного аппарата или другого объекта в состыкованной с буксиром грузовой платформе. Имеются устройства как для стыковки “пустой” грузовой платформы, так и для расстыковки загруженной платформы и приема новой “пустой” платформы. **Многоугольный межорбитальный буксир** будет обеспечивать периодическую доставку на геостационарную орбиту новых (незагруженных) платформ. Он специализируется на снабжении этой

орбиты серийными грузами и порожнего возвращения на рабочую орбиту высотой около 800 км для забора нового груза. **Буксир третьей модификации** будет понижать высоту перицентра грузовой платформы с собранными пассивными аппаратами до 800 км. В принципе возможно и может оказаться экономически целесообразным совмещение в одном транспортном средстве второго и третьего типа буксира, но этот вариант, требующий экономических оценок, не рассматривается. Было предложено все модификации буксира оснастить электроракетным двигателем с ЯЭУ мощностью 150 кВт. Кроме того, с радиационно-безопасной орбиты высотой 800 км каждый буксир достигает геостационарной орбиты своим ходом.

На основе универсального буксира можно создать серию космических средств транспортного и транспортно-энергетического назначения, в том числе:

– заправщика рабочим телом (например, ксенонном) электроракетных двигательных установок поддержания орбиты тяжелых информационных аппаратов для увеличения ресурса их работы;

– ремонтника, который доставляет и заменяет вышедшие из строя или морально устаревшие модули дорогостоящих информационных ИСЗ;

– монтажника, собирающего на рабочих орбитах тяжелые космические аппараты или комплексы из доставляемых служебных и функциональных модулей;

– транспортные средства для перемещения космических аппаратов из одной рабочей точки геостационарной орбиты в другую.

Буксир второй модификации может быть использован как электроракетный транспортный аппарат для доставки космических аппаратов или других полезных грузов на любые орбиты и транспортировки их с одной орбиты на другую. Третья модификация может быть использована для снятия с орбиты, например геостационарной, аварийного дорогого или уникального КА и доставки его на орбиту, например, близкую к орбите Международной космической станции, с целью выяснения причин неработоспособности, ремонта и последующего возвращения на рабочую орбиту. Близкой к этой задаче является необходимость снять с орбиты аппараты после выработки ресурса или прекращения по другим причинам функционирования.

#### УДАЛЕНИЕ “МЕЛКОГО” МУСОРА

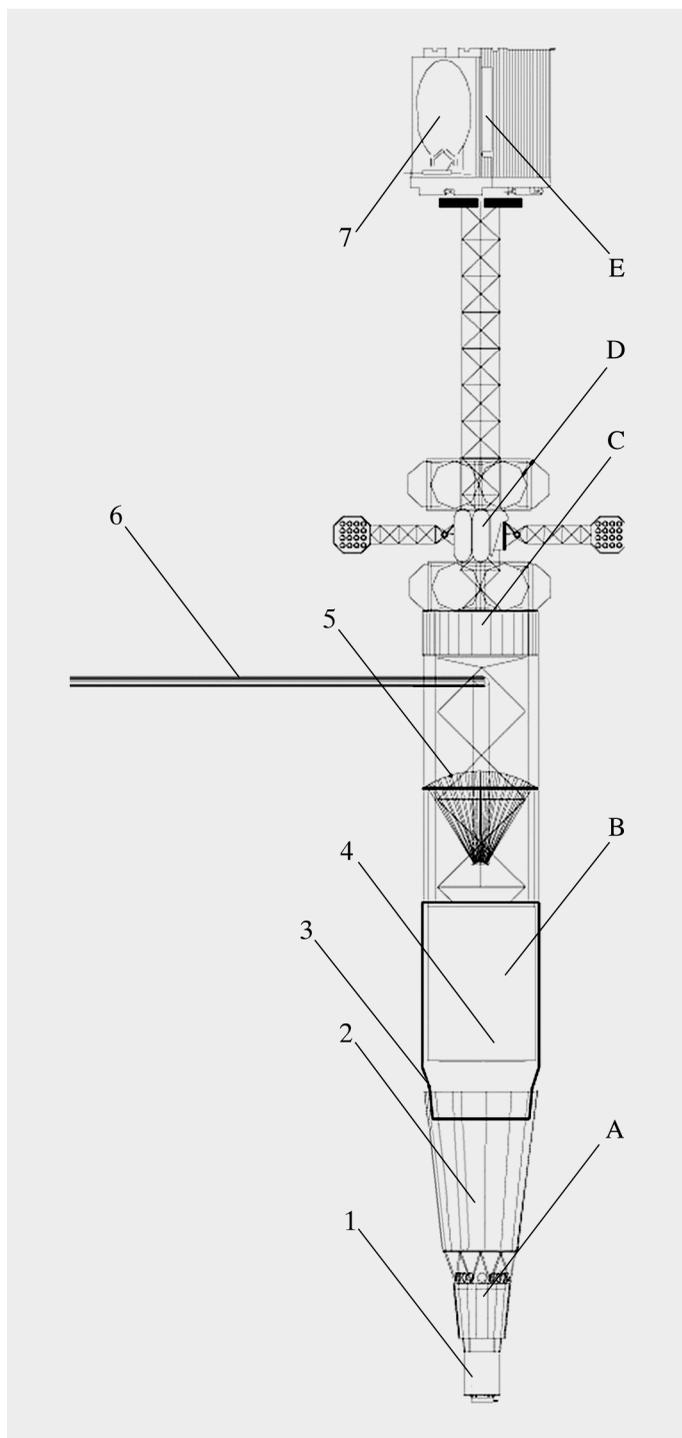
В начале XXI в. в РКК “Энергия” была предложена концепция очистки околоземного космоса

на высоте 800–2000 км от мелкого “мусора” размером 0,1–10 мм с помощью маневрирующего космического аппарата с ЯЭУ мощностью 150 кВт и ресурсом до 10 лет. Радиолокатор миллиметрового диапазона обнаруживает микрочастицы на расстоянии до 100 км, лазерный локатор выполняет точное наведение луча силового лазера на парах металлов с КПД до 30% на уничтожаемый “мусор”. При дальности 3 км возможно обеспечение плотности мощности на поверхности частицы  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. Чтобы испарилась алюминиевая частица диаметром 3 мм, нужна полная энергия в  $1,5 \times 10^5$  Дж. Для полной очистки космоса от мелких частиц потребуется несколько рассматриваемых аппаратов, их эффективность может быть повышена при использовании накопителей электроэнергии.

Рассматриваемую задачу нельзя решить при отсутствии мощного источника электроэнергии на борту. Поэтому использование ЯЭУ для двух целей – питания энергоемкой аппаратуры и мощной двигательной установки делает такую систему высокоэффективной.

#### ЭНЕРГОКОМПЛЕКСЫ С ДИСТАНЦИОННОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ЭНЕРГИИ

В перспективе ЯЭУ могут найти применение в космических системах по



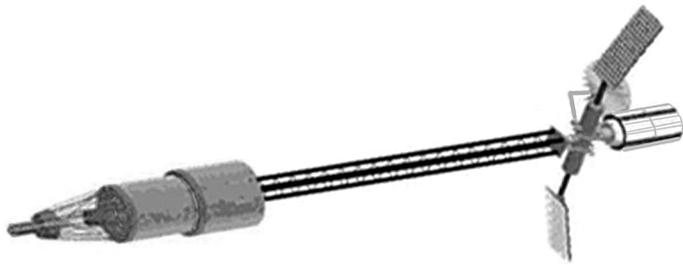
Маневрирующий КА с лазерной системой длиной 35 м для очистки космоса на высоте 1000–2000 км от “мелкого мусора”: А – ЯЭУ; В – силовой лазер; С – блок управления и энергоснабжения силовых систем; D – ЭРДУ; Е – блок систем управления КА и наведения; 1 – термоэмиссионный реактор; 2 – холодильник-излучатель ЯЭУ; 3 – термостат резонатора; 4 – резонатор; 5 – выводящая оптическая система; 6 – выходящий луч; 7 – антенна радара.

местить на достаточно безопасном расстоянии от расположенного в космосе потребителя электроэнергии. Целесообразность использования принципов беспроводной передачи электроэнергии в той или иной энергетической космической системе (несмотря на неизбежные потери электрической мощности в канале передачи) обусловлена следующими причинами:

- невозможность либо нецелесообразность применения ядерной или солнечной энергетической установки большой мощности в силу особенностей его целевого назначения и/или условий функционирования при большой потребной мощности системы электропитания;
- необходимость снабжения с помощью энергетической станции нескольких пространственно разделенных

дистанционной передаче энергии потребителям с помощью лазерного излучения. Энергетическую станцию на основе ЯЭУ можно раз-

*Многоразовый межорбитальный буксир на основе термоэмиссионной ЯЭУ и многомодульной электроракетной двигательной установки для доставки грузов на геостационарную орбиту и орбиту Луны. Проект РКК "Энергия". Конец 1980-х гг.*



космических потребителей;

– неприемлемо высокая удельная масса и/или относительно небольшой ресурс энергетической установки, приводящие к разделению источника энергии и потребителя;

– повышение эффективности космических средств за счет покрытия пиковых потреблений посредством беспроводной передачи энергии без увеличения проектной мощности автономных энергоустановок.

Таковыми потребителями могут быть различные космические средства.

Использование энергетических модулей с бортовой ЯЭУ на перспективных энергоемких исследовательских, сборочно-монтажных и других орбитальных станциях позволит практически полностью отказаться от крупногабаритных панелей солнечных батарей и громоздких электрических аккумуляторов. Низкий уровень микрогравитации технологических энергоемких аппаратов может быть обеспечен за счет передачи энергии от находящейся поблизости (но механически не свя-

занной) энергетической станции.

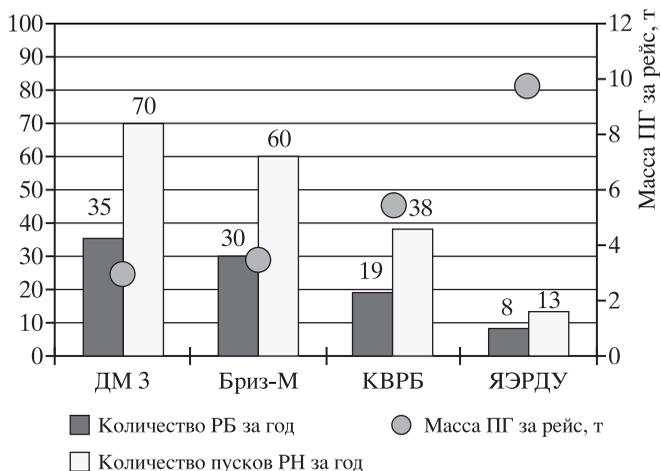
Система из трех-четырех космических энергетических модулей (орбитальных атомных электростанций) может быть использована для перевода космического аппарата с низкой опорной орбиты на геостационарную и другие орбиты за счет передачи по лазерному лучу энергии на борт с электроракетными двигателями. Энергетические модули с бортовой ЯЭУ на орбите вокруг Луны могут обеспечить питание по сфокусированному СВЧ или лазерному лучу лунной базы. Подобная схема энергоснабжения может быть реализована в будущем и для марсианской базы.

**МНОГОРАЗОВЫЙ БУКСИР  
ДЛЯ БОЛЬШИХ ГРУЗОПОТОКОВ**

Важнейший способ повышения эффективности транспортных операций в космосе – многоразовое использование элементов транспортной системы. ЯЭРДУ мощностью не менее 500 кВт позволяет создать многоразовый межорбитальный буксир

и тем самым значительно повысить эффективность многозвенной космической транспортной системы.

Особенно эффективна такая система в программе обеспечения больших годовых грузопотоков, например при освоении Луны. Предполагается создание и обслуживание постоянно наращиваемой обитаемой базы с экспериментальными технологическими и производственными комплексами. По проектам РКК "Энергия" при строительстве базы на поверхность Луны должны доставляться модули массой около 10 т, на орбиту Луны – до 30 т. Суммарный грузопоток с Земли на орбиту Луны при строительстве обитаемой лунной базы и посещаемой лунной орбитальной станции оценивается в 700–800 т, годового грузопотока для обеспечения функционирования и развития базы – в 400–500 т. Однако, учитывая достаточно длительное время транспортировки и значительное время нахождения полезного груза в радиационных поясах Земли, не все грузы могут быть



Гистограмма результатов анализа годовой потребности в разгонных блоках и ракетах-носителях для обеспечения годового грузопотока с орбиты Земли на орбиту Луны в пределах 100 т/год. Преимущество ядерного электроракетного буксира по сравнению с ЖРД – снижение в 4–7 раз количества требуемых пусков РН “Протон”. РБ – разгонный блок, РН – ракетаноситель, ПГ – полезный груз.

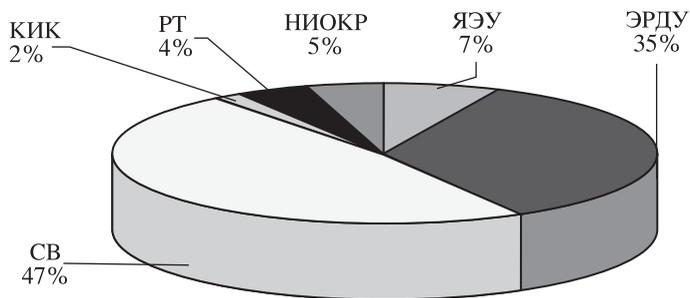
доставлены с использованием межорбитального буксира с ЯЭРДУ. С учетом этих обстоятельств межорбитальный буксир на основе ЯЭРДУ может обеспечить грузопоток примерно 100–300 т/год.

Наша страна в настоящее время занимает около 40% мирового рынка коммерческих транспортных услуг по обеспечению запуска КА в космос. Новые технологии, в том числе основанные на использовании ЯЭУ и ЭРДУ, могут позволить снизить удельную стоимость космической транспортировки, увеличить в несколько раз массу доставляемых неделимых

грузов и не только сохранить мировое лидерство в обеспечении коммерческих пусковых услуг, но и повысить эту долю.

Существенное влияние на техническую эффективность оказывает величина стартовой массы межорбитального буксира на сборочно-монтажной радиационно-безопасной орбите высотой не менее 800 км, то есть фактически грузоподъемность используемых сейчас ракет-носителей. Один из путей повышения эффективности с ЯЭРДУ – увеличение стартовой массы до предельной грузоподъемности РН по доставке

грузовых модулей на радиационно-безопасную орбиту. Так, на примере обеспечения грузопотока между орбитами Земли и Луны в 100 т/год показано, что при двухпусковой схеме развешивания ММБ с использованием различных РН (существующих и перспективных) оптимальным будет межорбитальный буксир с ЯЭУ мощностью 0,8–1,7 МВт и ЭРДУ судельным импульсом 42–61 км/с. Оптимальная продолжительность рейса составит



Структура затрат транспортной системы, состоящей из многоразовых межорбитальных буксиров и позволяющей обеспечивать грузопоток 100 т/год. ЯЭУ – ядерная энергоустановка; ЭРДУ – электроракетная двигательная установка; НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки; СВ – средства выведения; КИК – контрольно-измерительный комплекс; РТ – рабочее тело.

6–9 месяцев, в зависимости от типа ракеты-носителя.

Высокую эффективность космической транспортной системы с использованием рассматриваемого буксира наглядно демонстрирует сравнение эффективности электроракетного (ЯЭРДУ) и буксиров на основе различных разгонных блоков с химическими ракетными двигателями (ДМ-3, Бриз-М, КВРБ). Показано преимущество ядерного буксира как в возможности доставки груза в 2–3 раза большей массы, по сравнению с ЖРД, так и по количеству требуемых пусков ракет-носителей класса “Протон” (снижение в 4–7 раз).

#### ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ БУКСИРА

В качестве критерия экономической эффективности межорбитальной транспортной системы целесообразно использовать значение удельной стоимости транспортировки единицы массы полезного груза с поверхности Земли на целевую орбиту. Экономико-математическая модель для оценки экономической эффективности буксиров учитывает основные элементы затрат в транспортной системе: на создание и

выведение на орбиту (с помощью ракеты-носителя и разгонного блока) модулей буксира, на закупку рабочего тела электроракетной установки, эксплуатационные затраты, а также затраты на проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) и возможные капитальные затраты. Удельная доля затрат существенно зависит от ресурса ЯЭУ и количества буксиров для выполнения заданного годового грузопотока. Так, например, для одного многоразового буксира с ЯЭУ мощностью 1 МВт, ресурсом 5 лет и заменой электроракетной установки в каждом рейсе в задаче доставки грузов с орбиты Земли на орбиту Луны основные составляющие удельной стоимости – затраты на выведение (40–50%), изготовление электроракетных двигателей установок для каждого рейса (30–35%), изготовление ЯЭУ (6–8%). Затраты на НИОКР, отнесенные к единичному изделию, составят 30–40%. При больших грузопотоках, например 100 т/год, потребуются флот из 6–8 таких буксиров, доля НИОКР снизится до 6% при затратах на ЯЭУ до 10%.

Стоимостные показатели зависят от оптималь-

ных параметров буксира, то есть предполагается, что максимальная эффективность с экономической точки зрения обеспечивается достижением оптимальных технических характеристик. Учитывается также влияние фактора времени на величину удельной стоимости транспортировки.

Комплекс выполненных в РКК “Энергия” проектных исследований показал экономическую эффективность применения многоразового буксира на основе ЯЭУ мощностью порядка 1 МВт по сравнению с одноразовым буксиром с ЖРД при доставке на орбиту Луны высотой 100 км полезного груза суммарной массой 100 т в год. Удельная стоимость доставки на низкую опорную орбиту единицы массы полезного груза с помощью ядерного электроракетного буксира на ракете-носителе грузоподъемностью такой, как у “Протона-М”, будет в три раза ниже, чем при использовании одноразовых буксиров на основе разгонных блоков с ЖРД. Ядерные источники электроэнергии мощностью в несколько мегаватт и маршевые электроракетные плазменные двигатели могут обеспечить индустриализацию околоземного космоса и промышленное освоение Луны.