

# КОГДА ПОЛЕТЯТ КОСМИЧЕСКИЕ КОРАБЛИ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Электрические ракетные двигатели имеют исключительно высокий удельный импульс, составляющий до 100 км/с и более, они не ограничены в энергии, у них скорость выхлопа (или удельный импульс) может быть намного больше, чем та, которая доступна в химическом реактивном двигателе.

**Х**имические реактивные двигатели космических аппаратов создают тягу за счет термодинамического расширения нагретого газа-вытеснителя через сопло. Но для миссий, которые требуют большого приращения скорости, нужен альтернативный метод движения, имеющий более высокую удельную скорость импульса или скорости отработанного газа, чем тот, который может быть достигнут с использованием термодинамического расширения на химическом топливе. Электрическая установка космического корабля предлагает именно такую возможность.

Многие ракетные двигатели крайне малы. К примеру, двигатели ориентации на спутниках вообще не создают большую тягу. Иногда на спутниках практически не используется топливо — газообразный азот под давлением выбрасывается из резервуара через сопло.

Электрические двигательные установки космического корабля создают тягу — применяя электрические и, возможно, магнитные процессы для ускорения частиц, используя энергию, генерируемую солнечными батареями. Новые конструкции должны найти способ ускорить ионы или атомные частицы до высокой скорости, чтобы сделать тягу более эффективной.

Электрические двигательные установки не ограничены в энергии. Пренебрегая соображениями срока службы компонентов, произвольно большое количество энергии может быть доставлено (от солнечной или ядерной энергетической системы) к заданной массе ракетного топлива, так что скорость выхлопа (или удель-



ный импульс) может быть намного больше, чем та, которая доступна из химического движителя.

Транспортные средства с электроприводом имеют более низкое отношение тяги к массе (и, следовательно, низкое ускорение), но они могут иметь большее общее количество импульсов (произведение удельного импульса и массы топлива, равного общему изменению импульса), чем химическая силовая установка. Таким образом, хотя химическая силовая установка может обеспечивать высокое отношение тяги к массе, топливо расходуется в течение короткого времени при низком удельном импульсе. Напротив, электрическая силовая установка с низким отношением тяги к массе может работать в течение периодов от часов до лет и создавать большой общий импульс.

## ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ВЫСОКИЙ УДЕЛЬНЫЙ ИМПУЛЬС

Электрические ракетные двигатели имеют исключительно высокий удельный импульс, составляющий до 100 км/с и более. Однако при этом также требуют значительного расхода энергии (1–100 кВт/Н тяги) и малое отношение тяги к площади поперечного сечения реактивной струи (не более 100 кН/м<sup>2</sup>), что ограничивает максимальную целесообразную тягу ЭРД несколькими десятками ньютонов. Недостатком электрических

Двигательная установка «Спейс шаттла» сочетает в себе основные типы химических ракетных двигателей: боковые ускорители — РДТТ; маршевые двигатели — ЖРД. Но такие двигатели являются ограниченными по энергии, поскольку химические реагенты имеют фиксированное количество энергии на единицу массы, что ограничивает достижимую скорость выхлопа, или удельный импульс



ракетных двигателей также является малое ускорение космического аппарата, которое составляет десятые или даже сотые доли ускорения свободного падения (g), что ограничивает применение таких двигателей только космическим пространством. Поэтому для запуска космического аппарата с Земли к другим планетам необходимо комбинировать обычные химические ракетные двигатели с электрическими.

## ЗАДУМАНО ЦИОЛКОВСКИМ

Впервые идею использования электрической энергии для полета ракет высказывал К. Э. Циолковский еще в 1912 г. В статье «Исследование мировых пространств реактивными приборами» («Вестник воздухоплавания», № 9, 1912) он писал: «... с помощью электричества можно будет придавать громадную скорость выбрасываемым из реактивного прибора частицам...». В 1916–1917 гг. Р. Годдард экспериментально подтвердил реальность осуществления этой идеи.

Один из первых действующих электрических ракетных двигателей был создан под руководством В. П. Глушко в 1929–1933 гг. Впоследствии на некоторое время работы по разработке ЭРД были прекращены. Они возобновились только в конце 1950-х — начале 1960-х гг. И уже к началу 1980-х гг. в СССР и США испытано около 50 различных конструкций электрических ракетных двигателей в составе космических аппаратов и высотных атмосферных зондов.

В настоящее время ЭРД широко используются в космических аппаратах, как в спутниках, так и в межпланетных космических аппаратах.

Существует три основных типа электрических движителей, которые классифицируются в соответствии с методом, используемым для ускорения топлива, как электротермический, электростатический и электромагнитный. Практические двигательные установки часто используют одновременно два или даже все три из этих методов. Рассмотрим некоторые из них.

## ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

Электротермические двигательные установки ускоряют движение топлива с помощью нагрева. Существует три подтипа: резистивные, струйные и индуктивно или радиационно нагретые системы.

Резистивные работают, пропуская газообразное топливо через электрический нагреватель, а затем расширяя его через обычное сопло для создания тяги. Они обычно работают как усовершенствованные химические двигательные установки, где электрический нагрев используется для дальнейшего расширения и ускорения топлива, которое уже подверглось химической реакции.

На сегодняшний день наиболее успешным применением этого метода является перегрев каталитически разложенного гидразина, что дает преимущество в применении топлива с часто используемой монотопливной химической двигательной установкой.

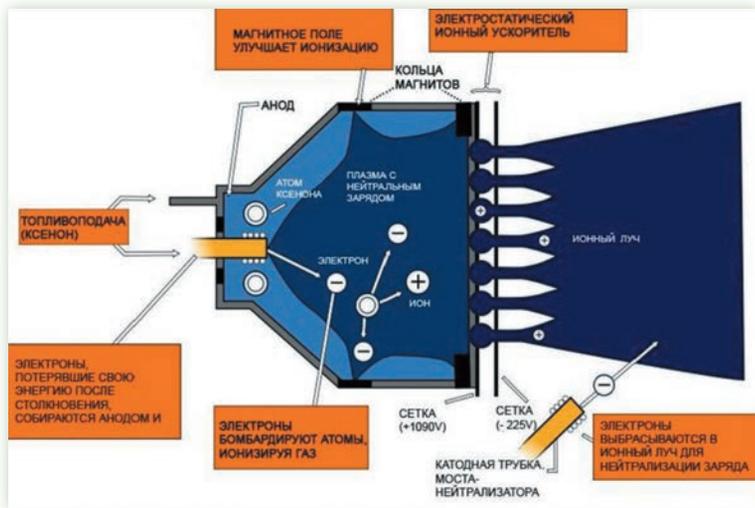
Удельный импульс, который может быть достигнут с помощью гидразиновых резистоструй, ограничен, потому что молекулярная масса используемых газов относительно высока, притом что максимальная температура поверхности нагрева, которую можно поддерживать с доступными материалами, ограничена примерно 3 000 К. Это приводит к получению выхлопа скоростью около  $3\,500\text{ мс}^{-1}$  ( $I_{sp} = 350\text{ с}$ ), примерно на 40 % лучше, чем без перегрева, с КПД до 80 %.

Резистивные двигатели были впервые использованы экспериментально в космосе в середине шестидесятых годов. Их первое эксплуатационное использование было в 1980-х гг. для удержания станций север-юг на геостационарных спутниках связи серии Intelsat-V. Они также использовались для выведения на орбиту, контроля ориентации и орбиты спутниковой группировки Iridium.

Для электротермических двигательных систем, чтобы достичь скорости выхлопных газов значительно выше, чем  $10\,000\text{ мс}^{-1}$ , части потока должны достигать температуры, превышающие 10 000 К, и в то же время находиться вне контакта со стенками двигателя. Струйные двигатели выполняют это, пропуская газы через электрическую дугу, которая нагревает их, прежде чем они расширяются, через сопло.



Принцип работы электрических двигательных установок основан на преобразовании электрической энергии в направленную кинетическую энергию частиц, используя электрическую энергию бортовой энергоустановки космического аппарата



Температуры активной зоны от 10 000 до 20 000 К означают, что при использовании каталитически разложенного гидразина возможны скорости выхлопа  $5000\text{--}6000 \text{ м с}^{-1}$  ( $I_{sp} = 500\text{--}600 \text{ с}$ ) при КПД около 40 %.

Двигатели Arcjet были введены в коммерческое использование для станций север — юг, поддерживающих серию геостационарных спутников связи Telstar-4 в 1993 г. В испытательных полетах были продемонстрированы более мощные двигатели, обеспечивающие достаточную тягу для перемещения по орбите или для маневров первичного толчка, но проблемы с эрозией и доступностью электродов, а также достаточного количества электроэнергии задержали их применение для оперативных задач.

## ИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

В сеточных электростатических ионных ускорителях, также известных как ионные двигатели, ионы образуются в магнитоизолирующей ионизационной камере с помощью разряда постоянного тока, радиочастотной энергии или настроенного электронного циклотронного резонанса. Выход из ионизационной камеры закрыт двойной решетчатой структурой с пространством между решетками от половины до одного миллиметра, через которое подается потенциал ускорения ионов. Ионы, которые приближаются к внутренней (экранной) сетке, извлекаются из камеры и ускоряются полем между сетками. Ионная оптика устроена так, чтобы минимизировать столкновения с внешней ускоряющей сеткой. Электроны извлекаются из камеры анодом и накачиваются источником питания на внешний катод/нейтрализатор, удерживаемый немного выше потенциала ускоряющей решетки. Электроны с катода соединяются с выходящим потоком ионов, чтобы нейтрализовать его. Нейтрализация ионного потока необходима, потому что выброс заряженных частиц с космического корабля заставляет само транспортное средство получать заряд, который влияет на работу других систем космического корабля и может вызвать постоянное повреждение. Кроме того, без нейтрализации возникающий ионный пучок будет зависеть от своего собственного внутреннего потенциала. Ионные двигатели достигают скорости выхлопа в области  $30\,000 \text{ м с}^{-1}$  ( $I_{sp} = 3\,000 \text{ с}$ ). Космический корабль EKA EURECA продемонстрировал работу RITA, ионного двигателя, использующего радиочастотную ионизацию, в 1992 г. Ионные двигатели были в эксплуатации с середины девяностых годов для обслуживания станций на геостационарных спутниках. В 1998 г. NASA Deep Space 1 стало первой межпланетной миссией, использующей ионную тягу.

Ионные двигатели страдают от низкой плотности тяги (доступной тяги на единицу площади выхлопа), поскольку максимальная

Электрическая ракетная двигательная установка состоит из самого ЭРД, строение которого зависит от его типа, систем подачи рабочего тела, систем управления и электропитания. Электротермический РД нагревает поток рабочего тела за счет тепла, выделяемого нагревательным элементом, или в электрической дуге. В качестве рабочего тела используются гелий, аммиак, гидразин, азот и другие инертные газы, реже — водород

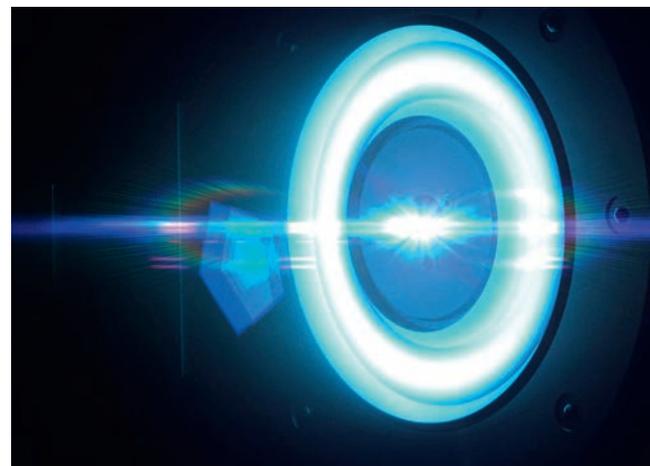
плотность ионного тока, которая может поддерживаться, ограничена искажениями пространственного заряда приложенного электрического поля. Одно из преимуществ движителя с эффектом Холла, выбранного для SMART-1, по сравнению с двигателем с электростатическими ионами состоит в том, что, поскольку плазма в двигателе с эффектом Холла остается практически нейтральной из-за присутствия электронов, составляющих ток Холла, они способны выдерживать более высокие плотности ионного тока и, следовательно, предлагают большую плотность тяги.

## ПРЕИМУЩЕСТВА

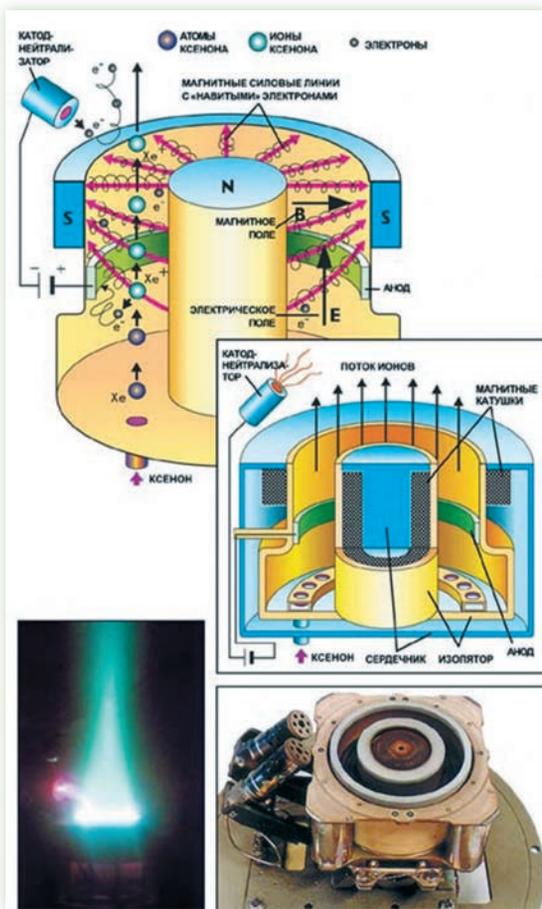
Чем же плазменные двигатели лучше обычных химических, в частности жидкостных ракетных двигателей (ЖРД)? Главное преимущество — в удельном импульсе, т. е., грубо говоря, в той скорости, с которой двигатель выбрасывает реактивную струю.

Скорость струи ЖРД составляет от примерно 2 км/с, у простейших термокаталитических двигателей, до 4,5 км/с у лучших моделей двигателей, работающих на водороде и кислороде.

То, что для ЖРД является рекордным показателем, для плазменных двигателей — посредственный результат, характерный разве что для первых недоработанных прототипов. Как правило, скорость струи плазменного двигателя находится на уровне 10 км/с и более. Некоторые двигатели обеспечивают 30–50 км/с. Предела тут, по сути, не существует! Скорость ограничена лишь тем, что чем она выше — тем больше электроэнер-



Электростатические двигательные установки ускоряют ионизированное топливо с помощью электрического поля. Основными методами являются полевые электростатические двигатели (ФЕЕП), коллоидные двигатели и ускорители с точными ионами



◀ Один из вариантов — «мини-геликонный плазменный толкатель» российского ученого Олега Батищева. Газ поступает в кварцевую цилиндрическую камеру. На нее навита металлическая обмотка, создающая внутри камеры сильное магнитное поле. Рядом расположена антенна специальной конструкции, которая служит источником коротковолнового радиоизлучения. Оно создает в газе электрический пробой, который приводит к рождению ионно-электронной плазмы. Внешнее магнитное поле рассчитано таким образом, что оно сильно разгоняет плазменные потоки и направляет их к выходу из камеры. Благодаря этому и возникает реактивная тяга. Этой тягой можно управлять, меняя темпы подачи газа и поступления электромагнитной энергии

Плазменный ракетный двигатель представляет собой тип электрического двигателя, который генерирует тягу от квазинейтральной плазмы. Этот тип двигателя малой тяги часто генерирует источник плазмы с использованием радиочастоты или микроволновую энергию, используя внешнюю антенну. Этот факт в сочетании с отсутствием полых катодов (которые очень чувствительны ко всем газам, кроме немногих благородных газов) позволяет использовать этот тип двигателя малой тяги на огромном диапазоне ракетного топлива.

### УВЫ, ЕСТЬ И НЕДОСТАТКИ...

Во-первых, малый КПД, который у такого типа двигателей, как правило, составляет 8–15 %.

Во-вторых, малый запас рабочего тела. Ведь у двигателя нет никакого внешнего бака с рабочим телом, все, что есть, — небольшое количество внутри самого двигателя. В результате для таких двигателей такой параметр, как «удельный импульс», теряет смысл, вместо него используется «полный импульс» — произведение массы рабочего тела в двигателе на скорость его истечения. У конкретно самого первого двигателя эта величина находилась на уровне 1500 Н\*с, что совсем немного.

У электрических ракетных двигателей на сегодняшний день есть следующие области применений:

- ✓ ориентация космических аппаратов в пространстве (повороты вокруг осей);
- ✓ коррекция малых возмущений орбиты;
- ✓ небольшие орбитальные маневры (например, уход с геостационарной орбиты на орбиту захоронения);
- ✓ переход между удаленными орбитами (например, с геопереходной орбиты на геостационарную);
- ✓ полеты к другим телам Солнечной системы, поскольку плазменные двигатели лучше подходят для дальних межпланетных космических путешествий.

гии двигатель тратит на создание той же тяги. Поэтому чрезмерный рост скорости неоправдан, для каждой ситуации есть некоторое оптимальное значение.

Кроме того, плазменные двигатели такого типа имеют следующие преимущества: предельная простота и, соответственно, дешевизна конструкции (в частности, полностью отсутствуют отдельные системы хранения и подачи рабочего тела); очень высокая надежность; возможность работы на самых разных рабочих телах; компактность и малая масса; отсутствие сжатых газов, токсичных, химически активных, пожароопасных и т. д. веществ, т. е. абсолютная безопасность двигателя в выключенном состоянии; простота регулировки потребляемой мощности, работоспособность при сколь угодно малой мощности питания (можно заряжать конденсатор за десятую долю секунды, а можно — за десятки секунд).

Плазменные двигатели имеют значение удельного импульса (I<sub>sp</sub>) гораздо выше, чем большинство других видов ракетной техники. Так, двигатель VASIMR способен достичь импульсного значения свыше 12 000. Это намного больше, чем химические на двухкомпонентном топливе, которые могут достичь импульса 450. С высоким импульсом ракеты с плазменными двигателями способны достигать относительно высоких скоростей.

**Будущее плазменных двигателей связано с двумя диаметрально противоположными направлениями: двигатели для наноспутников (космических аппаратов массой в пределах 10 кг) и высокоомощные двигатели для больших орбитальных маневров и полетов к другим телам Солнечной системы.**

Наука и техника стремительно развиваются, и, вероятно, скоро мы услышим новости о созданных новых электрических ракетных двигателях ▶

