

[ [Главная](#) ] [ [Вверх](#) ] [ [Новости](#) ] [ [Это интересно](#) ] [ [Юмор](#) ] [ [Ссылки](#) ] [ [Поиск](#) ] [ [Гостевая книга](#) ]  
[ [Карта сайта](#) ] [ [Контакты](#) ]  
[Главная](#) > [Это интересно](#) > [Статьи, доклады и т.п.](#) > [Новый рассвет электрических ракет](#)

## Новый рассвет электрических ракет

Эффективные плазменные электрореактивные двигатели открывают новые горизонты в исследованиях пограничных областей Солнечной системы

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- В обычных ракетных двигателях тяга возникает в результате сжигания химического топлива. В электрореактивных она создается посредством ускорения электрическим или магнитным полем облака заряженных частиц или плазмы.
- Несмотря на то что электрические ракетные двигатели характеризуются гораздо меньшей тягой, они позволяют при той же массе топлива в итоге разогнать космический аппарат до гораздо большей скорости.
- Способность достигать высоких скоростей и высокий КПД использования рабочего вещества («топлива») делают электрореактивные двигатели перспективными для дальних космических полетов.

Одиноким во мраке космоса, зонд *Dawn* («Рассвет») NASA несется за орбиту Марса к поясу астероидов. Он должен собрать новые сведения о начальных этапах образования Солнечной системы: исследовать астероиды Весту и Цереру, представляющие собой крупнейшие остатки эмбрионов планет, в результате столкновения и взаимодействия которых друг с другом около 4,5-4,7 млрд лет назад сформировались сегодняшние планеты.

Однако этот полет примечателен не только своей целью. *Dawn*, стартовавший в октябре 2007 г., оснащен плазменным двигателем, способным сделать реальностью полеты на большие расстояния. На сегодняшний день существует несколько типов таких двигателей. Тяга в них создается посредством ионизации и ускорения электрическим полем заряженных частиц, а не путем сжигания жидкого или твердого химического топлива, как в обычных.

Создатели зонда *Dawn* из Лаборатории реактивной тяги NASA выбрали плазменный двигатель, поскольку для достижения пояса астероидов ему потребуется в десять раз меньше рабочего вещества, чем двигателю на химическом топливе. Традиционный ракетный двигатель позволил бы зонду *Dawn* достичь либо Весты, либо Цереры, но не обеих.

Электроракетные двигатели быстро завоевывают популярность. Недавний полет космического зонда *Deep Space 1* NASA к комете стал возможным благодаря применению электрической тяги. Плазменные двигатели создавали также тягу, требовавшуюся для попытки посадки японского зонда *Hayabusa* на астероид и для полета космического аппарата *SMART-1* Европейского космического агентства к Луне. В свете продемонстрированных преимуществ разработчики в США, Европе и Японии при планировании дальних полетов выбирают именно такие двигатели для будущих миссий по исследованию Солнечной системы и поиску за ее пределами планет, подобных Земле. Плазменные двигатели также позволят превратить космический вакуум в лабораторию для фундаментальных физических исследований.

## **Близится эра долгих полетов**

Возможность использования электричества при создании двигателей для космических аппаратов рассматривалась еще в первом десятилетии XX в. В середине 1950-х гг. Эрнст Штулингер (Ernst Stuhlinger), член легендарной команды немецких ракетчиков Вернера фон Брауна (Wernher von Braun), которая возглавила космическую программу США, перешел от теории к практике. Несколькими годами позднее инженеры Гленновского исследовательского центра NASA (который тогда назывался Льюисовским) создали первый работоспособный плазменный двигатель. В 1964 г. таким двигателем, который использовался для коррекции орбиты перед входением в плотные слои атмосферы, был оснащен аппарат, совершивший суборбитальный полет в рамках программы *Space Electric Rocket Test*.

Концепция плазменных электрореактивных двигателей независимо разрабатывалась и в СССР. С середины 1970-х гг. советские инженеры использовали такие двигатели для обеспечения ориентации и стабилизации геостационарной орбиты телекоммуникационных спутников, поскольку они расходуют малое количество рабочего вещества.

## **Ракетные реалии**

Достоинства плазменных двигателей особенно впечатляют в сравнении с недостатками обычных ракетных двигателей. Когда люди представляют себе стремящийся сквозь черную пустоту к далекой планете космический корабль, перед их мысленным взором возникает длинный факел пламени из сопла двигателей. На деле все выглядит совершенно иначе: почти все топливо расходуется в первые минуты полета, так что дальше корабль движется к своей цели по инерции. Ракетные двигатели на химическом топливе поднимают космические аппараты с поверхности Земли и позволяют корректировать траекторию в ходе полета. Но для исследования дальнего космоса они непригодны, поскольку для них требуется такое большое количество топлива, поднять которое с Земли на орбиту практичным и экономически приемлемым способом не представляется возможным.

В длительных полетах, чтобы достичь высокой скорости и точности выхода на заданную траекторию без дополнительных затрат топлива, зондам приходилось отклоняться от своего пути в направлении планет или их спутников, способных придать ускорение в нужном направлении за счет сил тяготения (эффект гравитационной рогатки, или маневр с использованием сил тяготения). Такой «окольный» маршрут ограничивает возможности запуска довольно короткими временными окнами, гарантирующими точное прохождение мимо небесного тела, которое должно играть роль гравитационного ускорителя.

Для проведения длительных исследований космический аппарат должен иметь возможность скорректировать траекторию движения, выйти на орбиту вокруг объекта и тем обеспечить условия выполнения поставленной задачи. Если совершить маневр не удастся, то время, доступное для наблюдений, будет очень коротким. Так, космический зонд *New Horizons NASA*, запущенный в 2006 г., приблизившись к Плутону спустя девять лет, сможет наблюдать его в очень короткий промежуток времени, не превышающий одних земных суток.

## **Уравнение движения ракеты**

Почему же до сих пор не был предложен способ отправить в космос достаточное количество топлива? Что препятствует решению данной проблемы?

Попробуем разобраться. Для объяснения используем основное уравнение движения ракеты — формулу Циолковского, которую специалисты применяют при расчете массы топлива, необходимой для данной задачи. Вывел ее в 1903 г. русский ученый К.Э. Циолковский, один из отцов ракетной техники и космонавтики.

По сути, данная формула математически описывает тот интуитивно осознаваемый факт, что чем выше скорость истечения продуктов сгорания из ракеты, тем меньше топлива нужно для осуществления данного маневра.

Представьте себе подающего в бейсболе (ракетный двигатель), стоящего с корзиной мячей (топлива) на скейтборде (космическом аппарате). Чем выше скорость, с которой он бросает мячи назад (скорость истечения продуктов сгорания), тем с большей скоростью будет катиться скейтборд после того, как он бросит последний мяч, или, что эквивалентно тем меньше мячей (топлива) потребуется ему для увеличения скорости скейтборда на заданную величину. Ученые обозначают это приращение скорости символом  $\Delta V$ .

Более конкретно: формула связывает массу топлива, необходимую ракете для выполнения конкретной задачи в дальнем космосе, с двумя ключевыми величинами: скоростью истечения продуктов сгорания из сопла ракеты и значением  $\Delta V$ , достижимым в результате сжигания данного количества топлива. Значение  $\Delta V$  соответствует энергии, которую должен затратить космический аппарат для изменения своего движения по инерции и выполнения требуемого маневра. Для данной ракетной технологии (обеспечивающей данную скорость истечения) уравнение движения ракеты позволяет рассчитать массу топлива, необходимую для достижения требуемого значения  $\Delta V$ . т.е. для выполнения необходимого маневра. Таким образом,  $\Delta V$  можно рассматривать как «цену» задачи, поскольку затраты на вывод топлива на траекторию полета обычно составляют основную часть затрат на выполнение всей задачи.

В обычных ракетах на химическом топливе скорость истечения продуктов сгорания невелика (3-4 км/с). Уже одно это обстоятельство ставит под сомнение целесообразность их применения для дальних полетов. Кроме того, форма уравнения движения ракеты показывает, что с увеличением  $\Delta V$  доля топлива в начальной массе космического аппарата («массовая доля топлива») растет экспоненциально. Следовательно, в аппарате для дальних полетов, требующих большого значения  $\Delta V$ , на топливо придется почти вся стартовая масса.

Рассмотрим несколько примеров. В случае полета к Марсу с низкой околоземной орбиты требуемое значение  $\Delta V$  составляет около 4.5 км/с. Из уравнения движения ракеты следует, что массовая доля топлива, необходимая для осуществления такого межпланетного перелета, составляет больше 2/3. Для полетов в более далекие области Солнечной системы, например к внешним планетам, требуется  $\Delta V$  от 35 до 70 км/с. На долю топлива в обычной ракете придется отвести 99,98% стартовой массы. При этом для оборудования или иной полезной нагрузки места не останется. По мере того как пунктами назначения космических аппаратов становятся все более далекие области Солнечной системы, двигатели на химическом топливе будут становиться все более бесперспективными. Возможно, инженеры найдут способ существенно увеличить скорость истечения продуктов сгорания. Но это весьма непростая задача. Потребуется очень высокая температура горения, что ограничивается как количеством энергии, выделяемой в результате химической реакции, так и жаропрочностью материала стенок ракетного двигателя.

### **Плазменное решение**

Плазменные двигатели позволяют получить гораздо более высокие скорости истечения. Тяга создается за счет ускорения плазмы — частично или полностью ионизированного газа — до скоростей, существенно превышающих предельные для обычных газодинамических двигателей. Плазма создается посредством сообщения газу энергии, например при облучении его лазером, микро- или радиочастотными волнами, либо с помощью сильных электрических полей. Избыточная энергия отрывает электроны от атомов или молекул, которые в результате этого приобретают положительный заряд, а оторванные электроны получают возможность свободно двигаться в газе, благодаря чему ионизированный газ становится гораздо лучшим проводником тока, чем металлическая медь. Поскольку плазма содержит заряженные частицы, движение которых в большой степени определяется электрическим и магнитным полями, воздействие на нее электрическим или электромагнитным полями способно ускорять ее компоненты и выбрасывать их в качестве

рабочего вещества для создания тяги. Необходимые поля можно создавать с помощью электродов и магнитов, используя внешние антенны или проволочные катушки, либо путем пропускания тока через плазму.

Энергию для создания и ускорения плазмы обычно получают от солнечных батарей. Но для космических аппаратов, направляющихся за орбиту Марса, потребуются атомные источники энергии, т.к. при удалении от Солнца интенсивность потока солнечной энергии уменьшается. Сегодня в автоматических космических зондах используются термоэлектрические устройства, нагреваемые за счет энергии распада радиоактивных изотопов, но для более продолжительных полетов потребуются ядерные или даже термоядерные реакторы. Включаться они будут только после вывода космического аппарата на стабильную орбиту, находящуюся на безопасном расстоянии от Земли, до начала работы ядерное топливо должно поддерживаться в инертном состоянии.

До уровня практического применения разработаны три типа электроракетных двигателей. Шире всего применяется ионный двигатель, которым и был оснащен зонд *Dawn*.

### **Ионный двигатель**

Идею ионного двигателя, одну из наиболее успешных концепций электрического метода создания тяги, выдвинул сто лет назад американский пионер ракетной техники Роберт Годдард (Robert H. Goddard), будучи еще аспирантом Вустерского политехнического института. Ионные двигатели позволяют получать скорости истечения от 20 до 50 км/с.

В наиболее распространенном варианте такой двигатель получает энергию от панелей фотоэлементов с запорным слоем. Он представляет собой короткий цилиндр размерами немного больше ведра, установленный в кормовой части космического аппарата. Из «топливного» бака в него подается газообразный ксенон, который поступает в ионизационную камеру, где электромагнитное поле отрывает от атомов ксенона электроны, создавая плазму. Ее положительные ионы вытягиваются и разгоняются до очень высоких скоростей электрическим полем между двумя сетчатыми электродами. Каждый положительный ион плазмы испытывает сильное притяжение к отрицательному электроду, расположенному в задней части двигателя, и поэтому ускоряется в направлении назад.

Истечение положительных ионов создает на космическом аппарате отрицательный заряд, который по мере накопления будет притягивать вылетевшие ионы обратно к аппарату, сводя тягу к нулю. Чтобы это предотвратить, используют внешний источник электронов (отрицательный электрод или электронную пушку), вводящий электроны в поток истекающих ионов. Таким образом обеспечивается нейтрализация истекающего потока, в результате чего космический аппарат остается электрически нейтральным.

Сегодня коммерческие космические аппараты (в основном — спутники связи на геостационарных орбитах) оснащены десятками ионных двигателей, которые используются для коррекции их положения на орбите и ориентации.

Первым в мире космическим аппаратом, в котором для преодоления земного тяготения при старте с околоземной орбиты была использована электрическая система создания тяги, стал в конце XX в. зонд *Deep Space 1*. Чтобы пролететь сквозь пылевой хвост кометы Боррелли, ему потребовалось увеличить скорость на 4,3 км/с, на что было израсходовано менее 74 кг ксенона (примерно такую массу имеет полная пивная бочка). Это самое большое на сегодня приращение скорости, полученное каким-либо космическим аппаратом с помощью тяги, а не гравитационной рогатки. *Dawn* вскоре должен превысить рекорд примерно на 10 км/с. Инженеры Лаборатории реактивного движения недавно продемонстрировали ионные двигатели, способные непрерывно работать больше трех лет.

Характеристики электроракетных двигателей определяются не только скоростью истечения заряженных частиц, но и плотностью тяги — значением силы тяги, приходющимся на единицу площади отверстия, через которое эти

частицы истекают. Возможности ионных и аналогичных электростатических двигателей ограничиваются объемным зарядом, который налагает очень низкий предел на достижимую плотность тяги. Дело в том, что по мере прохождения положительных ионов через электростатические сетки двигателя между ними неизбежно накапливается положительный заряд, который уменьшает напряженность электрического поля, ускоряющего ионы.

Из-за этого тяга двигателя зонда *Deep Space 1* эквивалентна примерно весу листа бумаги, что очень далеко от тяги двигателей в научно-фантастических фильмах. Для разгона автомобиля с помощью такой силы от нуля до 100 км/ч *{при отсутствии сопротивления движению: автомобиль, стоящий на земле, такая сила даже не сдвинет с места. — Прим. пер.}* потребовалось бы больше двух суток. В космическом вакууме, который не оказывает сопротивления, сообщить аппарату большую скорость способна даже очень малая сила, если она действует достаточно долго.

### **Холловский двигатель**

Вариант плазменного двигателя, называемый **ХОЛЛОВСКИМ**, свободен от ограничений, налагаемых объемным зарядом, и поэтому способен разгонять космический аппарат до высоких скоростей быстрее, чем ионный двигатель сравнимого размера (благодаря большей плотности тяги). На Западе данная технология получила признание в начале 1990-х г., на три десятилетия позже начала разработок в бывшем СССР.

Принцип действия двигателя основан на использовании фундаментального эффекта, открытого в 1879 г. Эдвином Холлом (Edwin H. Hall), который был тогда аспирантом в Университете Джонса Хопкинса. Холл показал, что в проводнике, в котором созданы взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля, возникает электрический ток (называемый холловским) в направлении, перпендикулярном обоим этим полям.

В холловском двигателе плазма создается электрическим разрядом между внутренним положительным электродом (анодом) и наружным отрицательным электродом (катодом). Разряд отрывает электроны от нейтральных атомов газа в промежутке между электродами. Образующаяся плазма ускоряется в направлении выходного отверстия цилиндрического двигателя силой Лоренца, которая возникает в результате взаимодействия приложенного радиального магнитного поля с электрическим током (в данном случае — холловским), который течет в азимутальном направлении, т.е. вокруг центрального электрода. Холловский ток создается движением электронов в электрическом и магнитном полях. В зависимости от располагаемой мощности скорости истечения могут составлять от 10 до 50 км/с.

Этот тип плазменного двигателя свободен от ограничений, налагаемых объемным зарядом, поскольку в нем ускоряется вся плазма (как положительные ионы, так и отрицательные электроны).. Поэтому достижимая плотность тяги и, следовательно, ее сила (а значит, и потенциально достижимое значение  $D V$ ) оказываются во много раз выше, чем у ионного двигателя таких же размеров. На спутниках на околоземных орбитах уже работает больше 200 холловских двигателей. И именно такой двигатель был использован Европейским космическим агентством для экономичного разгона космического аппарата *SMART-1* при полете к Луне.

Размеры холловских двигателей довольно малы, и инженеры пытаются создать такие устройства, чтобы к ним можно было подводить более высокие мощности, необходимые для получения высоких скоростей истечения и значений силы тяги.

Ученые из Лаборатории физики плазмы Принстонского университета достигли определенных успехов, установив на стенках холловского двигателя секционированные электроды, которые формируют электрическое поле таким образом, чтобы сфокусировать плазму в узкий выходной пучок. Конструкция уменьшает бесполезный неосевой компонент тяги и позволяет увеличить ресурс двигателя благодаря тому, что плазменный пучок не соприкасается со стенками двигателя. Немецкие инженеры достигли примерно таких же

результатов, применив магнитные поля особой конфигурации. А исследователи Стэнфордского университета показали, что покрытие стенок двигателя прочным поликристаллическим алмазом значительно повышает их стойкость к эрозии под действием плазмы. Все эти усовершенствования сделали холловские двигатели пригодными для дальних космических полетов.

### **Двигатель следующего поколения**

Один из способов дальнейшего повышения плотности тяги состоит в увеличении общего количества плазмы, ускоряемой в двигателе. Но с подъемом плотности плазмы в холловском двигателе растет частота соударений электронов с атомами и ионами, что мешает электронам переносить холловский ток, необходимый для ускорения. Использовать более плотную плазму позволяет магнитоплазодинамический (МПД) двигатель, в котором вместо холловского тока используется ток, направленный в основном вдоль электрического поля ([смотри](#)) и в гораздо меньшей степени подверженный разрушению из-за столкновений с атомами.

В общих чертах МПД-двигатель состоит из центрального катода, расположенного внутри цилиндрического анода большего размера. Газ (обычно пары лития) подается в кольцевой промежуток между катодом и анодом, где ионизируется электрическим током, текущим в радиальном направлении от катода к аноду. Ток создает азимутальное магнитное поле (окружающее центральный катод), а взаимодействие поля и тока порождает силу Лоренца, создающую тягу.

МПД-двигатель размером с обычное ведро способен перерабатывать около мегаватта мощности от солнечного или ядерного источника и позволяет получать скорости истечения от 15 до 60 км/с. Поистине, мал да удал.

Еще одно достоинство МПД-двигателя — возможность дросселирования: скорость истечения и тягу в нем можно регулировать, изменяя силу тока или расход рабочего вещества. Это дает возможность менять тягу двигателя и скорость истечения применительно к потребности оптимизации траектории полета. Интенсивные исследования процессов, ухудшающих характеристики МПД-двигателей и влияющих на срок их службы. в частности плазменной эрозии, нестабильностей плазмы и потерь мощности в ней, позволили создать новые двигатели с высокими характеристиками. В качестве рабочих веществ в них используются пары лития или бария. Атомы этих металлов легко ионизируются, что уменьшает внутренние потери энергии в плазме и дает возможность поддерживать более низкую температуру катода. Применение жидких металлов в качестве рабочих веществ и необычная конструкция катода с каналами, изменяющими характер взаимодействия электрического тока с его поверхностью, помогли существенно уменьшить эрозию катода и создать более надежные МПД-двигатели.

Группа ученых из академических организаций и NASA недавно завершила разработку новейшего «литиевого» МПД-двигателя под названием а2. потенциально способного доставить к Луне и Марсу космический аппарат с ядерной силовой установкой, несущий большую полезную нагрузку и людей, а также обеспечить полеты автоматических космических станций к внешним планетам Солнечной системы.

### **Черепаша побеждает**

Ионный, холловский и магнитоплаз-модинамический — три типа плазменных двигателей, уже нашедших практическое применение. За последние десятилетия исследователями предложено много перспективных вариантов. Разрабатываются двигатели, работающие в импульсном и в непрерывном режиме. В одних плазма создается с помощью электрического разряда между электродами, в других — индуктивным способом с помощью катушки или антенны. Различаются и механизмы ускорения плазмы: с использованием силы Лоренца, путем введения плазмы в создаваемые магнитным способом токовые слои, или с помощью бегущей электромагнитной волны. В одном из типов даже предполагается выбрасывать плазму через невидимые «ракетные сопла», создаваемые с помощью магнитных полей.

Во всех случаях плазменные ракетные двигатели набирают скорость медленнее обычных. Тем не менее благодаря парадоксу «чем медленнее, тем быстрее» они позволяют достичь далеких целей в более короткий срок, так как в итоге разгоняют космический аппарат до скорости значительно большей, чем двигатели на химическом топливе при той же массе топлива. Это позволяет избежать траты времени на отклонения к телам, обеспечивающим эффект гравитационной рогатки. Как в знаменитой истории о медлительной черепахе, которая в итоге обгоняет зайца, в «марафонских» полетах, которых в грядущую эру исследования дальнего космоса будет совершаться все больше, черепаха победит.

Сегодня самые передовые плазменные двигатели способны обеспечить DV до 100 км/с. Этого вполне достаточно для совершения полетов к внешним планетам за разумное время. Один из самых впечатляющих проектов в области исследования дальнего космоса предусматривает доставку на Землю образцов грунта с Титана — самого крупного спутника Сатурна, имеющего, по предположениям ученых, атмосферу, очень похожую на ту, которая окутывала Землю миллиарды лет назад.

Образец с поверхности Титана предоставит ученым редкую возможность поиска признаков химических предшественников жизни. Ракетные двигатели на химическом топливе делают такую экспедицию неосуществимой. Использование гравитационных рогаток увеличило бы время полета более чем на три года. А зонд с «маленьким, да удаленьким» плазменным двигателем сможет совершить такое путешествие значительно быстрее.

*Перевод: И.Е. Сацевич*

*Автор: Эдгар Суэйри.*

*"В мире науки". № 5 2009 года*



[Главная](#) > [Это интересно](#) > [Статьи, доклады и т.п.](#) > [Новый рассвет электрических ракет](#)  
[ [Главная](#) ] [ [Вверх](#) ] [ [Новости](#) ] [ [Это интересно](#) ] [ [Юмор](#) ] [ [Ссылки](#) ] [ [Поиск](#) ] [ [Гостевая книга](#) ]  
[ [Карта сайта](#) ] [ [Контакты](#) ]

[Ad: [Рейтинг@Mail.ru](mailto:Рейтинг@Mail.ru)]

© [Натали, Алекс и К°](#) 2003 - 2008 г.