

ГБОУ г. Москвы «Бауманская инженерная школа № 1580»

Олимпиада «Шаг в будущее»

**Профиль «Инженерное дело»
Специализация «Техника и технологии – физика»**

**Оптимальный двигатель
для межпланетных космических кораблей**
Проектно-исследовательская работа

Выполнил:
ученица 8 «З»
Морозова Варвара

Руководитель:
преподаватель технопарка
«Мосгормаш»
Сатюков Дмитрий
Геннадьевич

Москва 2021

Содержание

	Стр.
Введение	3
1. Используемые химические ракетные двигатели	4
1.1. Жидкостный ракетный двигатель	5
1.2. Твёрдотопливный ракетный двигатель	6
1.3. Гибридный ракетный двигатель	6
2. Постановка задачи и разрабатываемые ракетные двигатели	7
2.1. Электрический двигатель	8
2.2. Ядерный двигатель	10
2.3. Солнечный парус	12
3. Применение двигателей в межпланетном корабле	14
3.1. Предлагаемая автором проекта схема пилотируемого межпланетного космического корабля	14
3.2. Межпланетные зонды и их использование	17
Заключение	19
Список использованных источников	20

Введение

Человечество запустило первый космический аппарат в 1957 году (СССР), в 1961 году запустило первого человека в космос (СССР), в 1959 году достигло поверхности Луны (СССР), в 1969 высадило первого человека на Луну (США). За 60 лет человек достаточно хорошо освоил околоземное пространство и в настоящее время готовится к межпланетным перелётам.

Однако, до сих пор практически вся история покорения космоса прошла на однотипных двигателях, сущность которых остаётся неизменной.

С самого начала космической эры единственным способом выведения космических кораблей на околоземную орбиту было использование химического ракетного двигателя, при этом топливо занимает огромную долю в общей массе космического корабля (более 80 %).

Пилотируемый полёт к другим планетам Солнечной системы требует двигателей других типов, в противном случае масса полезной нагрузки космического корабля будет занимать десятые доли процента от общей массы.

Эта проектная работа рассматривает все виды существующих двигателей для космических аппаратов и предлагает оптимальный набор двигателей для исследования ближнего космоса.

1. Используемые химические ракетные двигатели (ХРД)

В настоящее время единственными двигателями, которые используются для выведения космических кораблей на околоземную орбиту являются химические ракетные двигатели.

В камере сгорания ХРД потенциальная (химическая) энергия топлива преобразуется в тепловую энергию в результате экзотермической реакции. Топливо, как правило, состоит из компонентов — горючего и окислителя.

Из камеры сгорания продукты реакции направляются в реактивное сопло. В сопле ХРД газ адиабатически расширяется. Давление и температура газа падают с нарастанием объёма по адиабатическому закону. В результате расширения газ приобретает высокую скорость истечения из сопла. Таким образом, ХРД преобразует часть химической энергии топлива в кинетическую энергию газовой струи.

Импульс газовой струи направлен по направлению истечения газов. Согласно закону сохранения импульса, при истечении газовой струи, струя и ракета получают одинаковые по модулю, но противоположенные по направлению импульсы. Другими словами, векторная сумма импульсов газа и ракеты равна нулю. Фактически это проявляется как возникновение реактивной тяги, развиваемой ХРД.

1.1. Жидкостный ракетный двигатель

Компоненты топлива хранятся в баках, вне камеры сгорания ХРД, находятся в жидком агрегатном состоянии. Они подаются в камеру сгорания через форсунки под давлением.

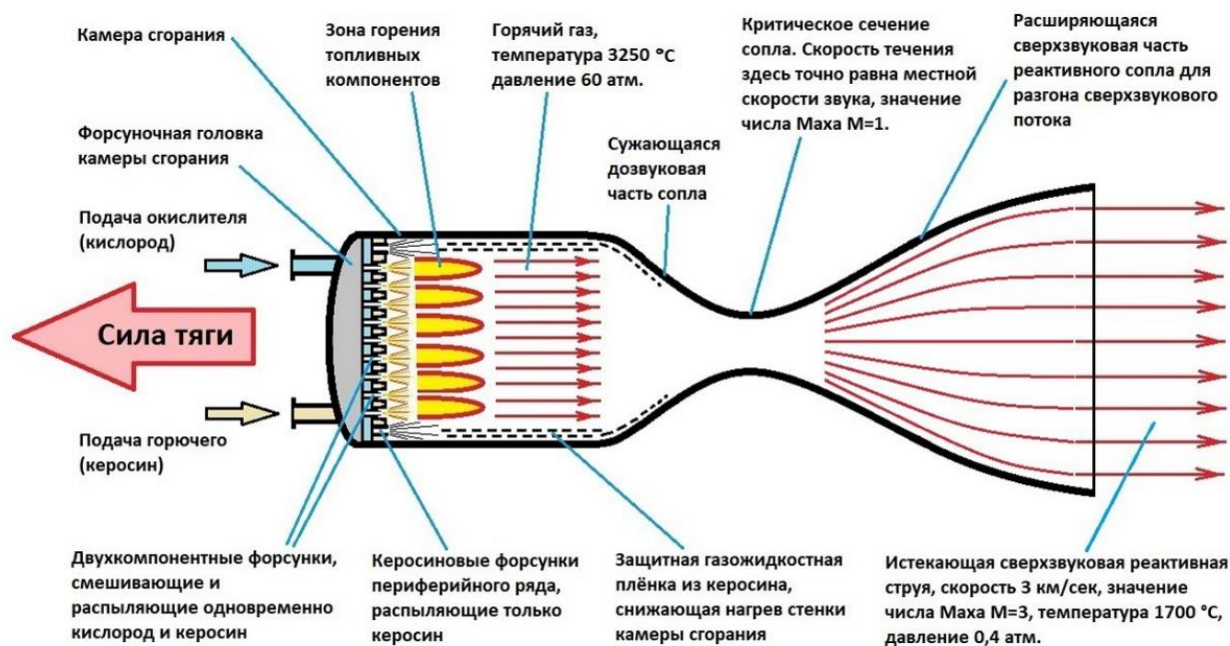
Этот тип двигателей получил широкое распространение на баллистических ракетах, ракетах-носителей для вывода космических аппаратов в космос. Жидкостные ракетные двигатели допускают регулирование тяги в широких пределах и многократное включение и выключение. Время для приведения ракеты из состояния хранения в предпусковое состояние значительно (может достигать десятков часов).

Удельный импульс жидкостного ракетного двигателя (то есть скорость выброса газов) достигает 4,5 км/сек (при использовании пары водород-кислород).

Такие двигатели применяются в основном на Российских космических ракетах (ранее – СССР), например РД-170 (работает на керосине и кислороде).

Самый мощный двигатель РД-170 (Россия) обладает тягой около 7,26 Меганьютонов.

Рис.1. Схема работы жидкостного ракетного двигателя



© Н. Цыгикало, 2020

1.2. Твёрдотопливный ракетный двигатель

Компоненты топлива хранятся в камере сгорания в отличие от жидкостного ракетного двигателя.

Этот тип двигателей обладает такими достоинствами, как простота и надёжность. Твёрдотопливный двигатель обладает малым временем для перевода из состояния хранения в предпусковое состояние. Как правило, компоненты топлива представляют собой спрессованную смесь топлива и окислителя. Для запуска двигателя требуется внешний источник пламени. После запуска такой двигатель работает до полной выработки топлива, многократный запуск невозможен. Конструктивная простота и дешевизна обусловила широкое применение таких двигателей в ракетомоделизме. Обладает ограниченными возможностями по регулированию величины тяги. Управление направлением вектора тяги может осуществляться газовыми рулями или поворотным реактивным соплом.

Удельный импульс жидкостного ракетного двигателя (то есть скорость выброса газов) достигает 3 км/сек.

Время работы от несколько секунд для неуправляемых боевых ракет и ракетомодельных двигателей до 2 минут для бокового ускорителя «Спейс шаттл».

Такие двигатели применяются в основном на космических аппаратах США, например Р-30.

Самый мощный твёрдотопливный двигатель Р-30 (США) обладает тягой около 12,45 Меганьютонов.

1.3. Гибридный ракетный двигатель

Один из компонентов находится в твёрдом состоянии и хранится в камере сгорания, оставшиеся компоненты подаются аналогично жидкостному двигателю. Позволяет совместить конструктивную простоту твёрдотопливного двигателя с полезными свойствами жидкостного двигателя (управление величиной тяги, многократный запуск).

В настоящее время этот тип не получил широкого распространения, но используется на суборбитальном самолёте «SpaceShipOne».

2. Постановка задачи и разрабатываемые ракетные двигатели

Химические реактивные двигатели являются самыми дешёвыми и самыми мощными из всех существующих двигателей в теории и на практике.

Сейчас главное при запуске космического корабля – преодолеть земное притяжение и вывести полезный груз на орбиту Земли.

Так как импульсы космического корабля и испускаемой им газовой струи равны, то корабль при движении от поверхности земли теряет часть своей массы. Более того, за то короткое время, пока он преодолевает атмосферу и выходит в космос, космический корабль с ХРД теряет большую часть своей массы. Например, ракета-носитель Восток-1, на котором Юрий Гагарин совершил первый в мире полёт человека в космос, имела массу 287 тонн, а масса космического аппарата всего 4,7 тонны, то есть ~1,6% от общей массы.

Но задача первого полёта человека в космос была вывести космический аппарат на околоземную орбиту, а сейчас стоят уже другие задачи – изучение солнечной системы на пилотируемых космических аппаратах.

Главное ограничение ХРД – расход топлива, составляющий более 80% общей массы космического корабля и в связи с этим возможность использования ХРД только в ближайшем пространстве Земли – на орбите и для полётов на Луну. Однако даже кратковременная пилотируемая экспедиция к Марсу или Венере с использованием химических двигателей потребует таких размеров необходимой для этого ракеты, что этот проект представляется трудно осуществимым.

Вес топлива и его расход являются самым критическим фактором для химических ракетных двигателей. Однако на создание импульса влияет не только масса топлива, выбрасывая которое по направлению к Земле, ракета приобретает вертикальную скорость, но и скорость этого выброса (удельного импульса). У ХРД удельный импульс составляет 3-4,5 км/с.

2.1. Электрический двигатель

Существуют и другие типы двигателей – электрические ракетные двигатели (ЭРД), у которых удельный импульс может достигать от 10 до 210 км/с.

Такие двигатели (чаще всего их называют ионными или плазменными двигателями) характеризуются малым расходом топлива (или рабочего тела). Теоретически их удельный импульс может достигать скорости света, однако в настоящее время для ЭРД различных типов оптимальной считается скорость истечения от 16 до 60 км/с.

В связи с тем, что процесс ускорения частиц в ЭРД проходит при низком давлении, плотность тяги довольно мала, что ограничивает применение ЭРД: внешнее давление не должно превышать давление в ускорительном канале, а ускорение космического аппарата очень мало (десятые доли g). Поэтому применение ЭРД вблизи поверхности Земли невозможно – только в открытом космосе.

В 1964 году на космических аппаратах Зонд-2 (СССР) в течение 70 минут функционировали ЭРД, с удельным импульсом 16 км/с.

В 1966 году на космическом аппарате Янтарь (СССР) была достигнута скорость истечения реактивной струи около 40 км/с.

На стендовых испытаниях удельный импульс достигал 70 км/с (США, 1968 год) и 140 км/с (СССР, 1970 год).

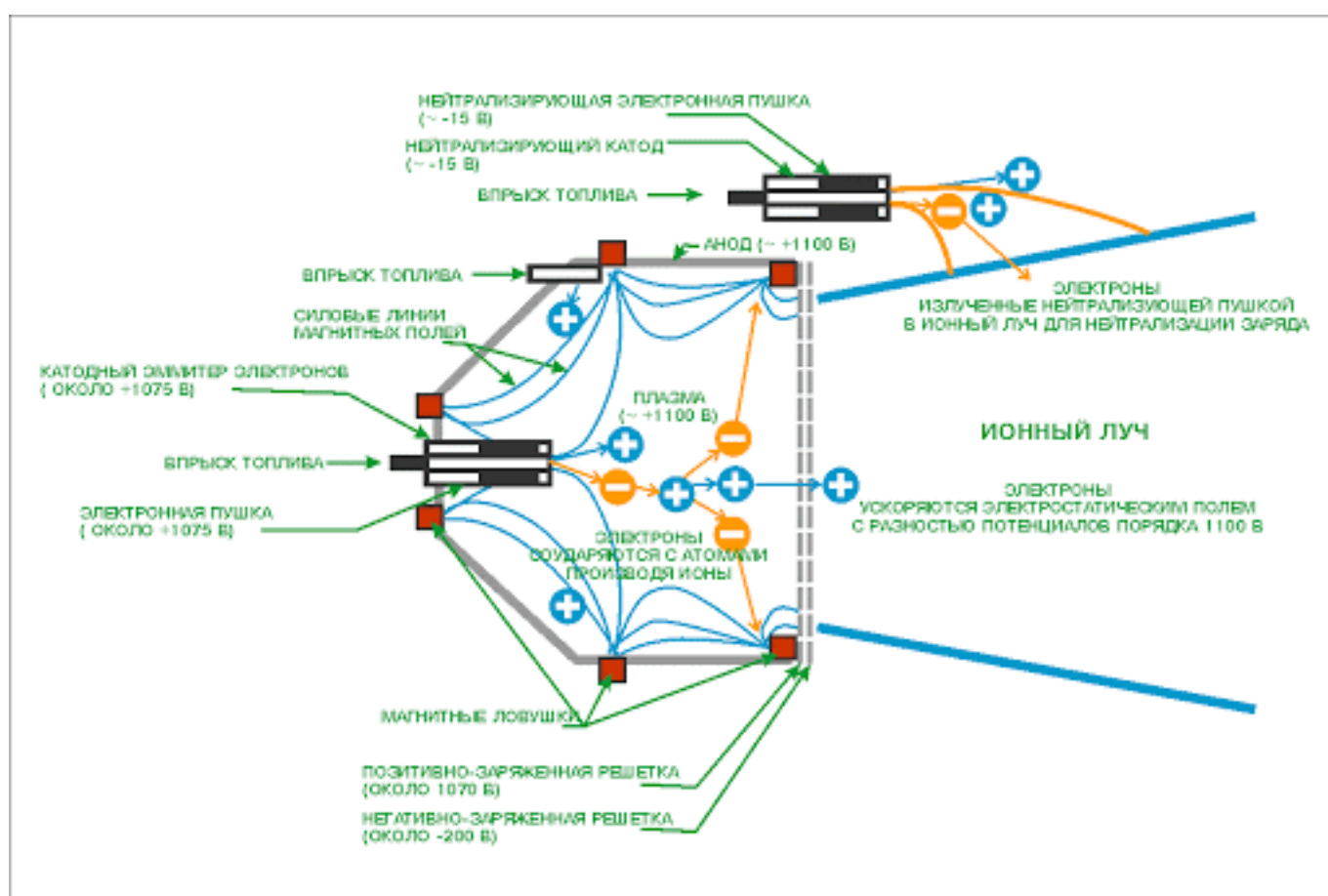
ЭРД характеризуются КПД до 80% и применяются, в основном, для коррекции направления движения и орбит малых космических аппаратов из-за своей малой тяги.

Увеличение тяги возможно как за счёт увеличения скорости реактивной струи, так и за счёт увеличения массы рабочего тела (топлива). Начальные эксперименты с ЭРД проводились на таких газах как аргон, фторопласт, азот, ксенон. В 1975 году на спутнике Космос-728 был испытан ЭРД, работающий на калии, который развил скорость истечения ~ 30 км/с.

В перспективе в ЭРД могут быть использованы жидкие металлы, такие как литий, цезий, калий, висмут, а в теории в ЭРД могут использоваться любые вещества, в том числе пролетающие мимо космического аппарата метеориты.

Электрическая мощность ЭРД колеблется от сотен watt до мегаватт, однако применяемые в настоящее время на космических аппаратах ЭРД имеют мощность от 800 до 2 000 Вт.

Рис.2. Схема работы электрического двигателя



2.2. Ядерный двигатель

Ядерный ракетный двигатель – разновидность ракетного двигателя, которая использует энергию деления или синтеза ядер для создания реактивной тяги. Главная проблема ЯРД – радиационное заражение атмосферы и поверхности Земли.

Удельный импульс ЯРД может составлять 30-50 км/с. Испытания показали, что тяга ЯРД составляет 0,3 Меганьютонов при удельном импульсе 8,5 км/с (проект NERVA, 1970 год, США) и 0,03 Меганьютона при удельном импульсе 9 км/с (проект РД-0410, 1978 год, СССР) однако действующих на космических аппаратах ЯРД на текущий момент не существует.

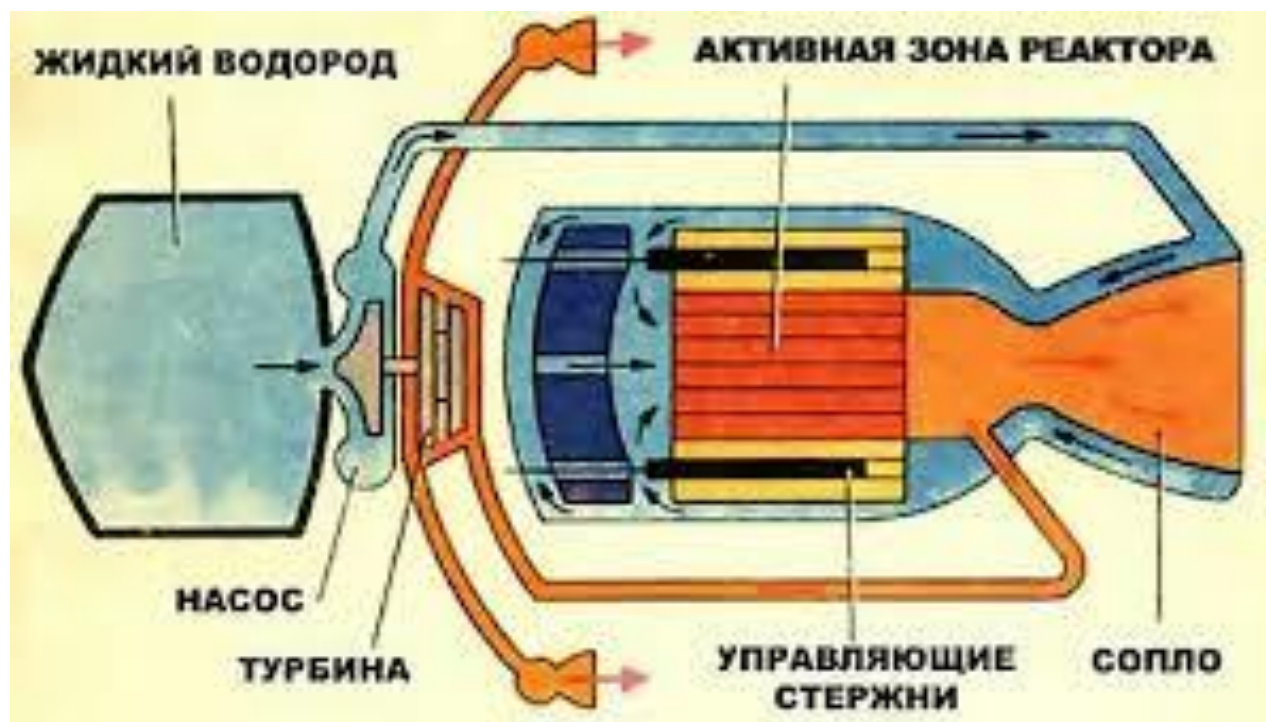
Разработки ЯРД наиболее перспективны. Согласно расчётам, до Марса на ЯРД можно долететь за 1,5 месяца вместо 1,5 лет на ХРД.

С 2010 года в России начались работы над проектом ядерной электродвигательной установки мегаваттного класса для космических транспортных систем. Существующий опытный образец при удельном импульсе 70 км/с развивает тягу до 750 Меганьютонов, его КПД – 75%. Это не ЯРД, в привычном понимании. Радиационное заражение окружающей среды не происходит, так как ядерная энергия используется только для выработки электроэнергии для ионного двигателя (см. выше). При этом выработка ядерной энергии происходит в замкнутом цикле.

В 2017 году Китай опубликовал данные по развитию космической программы КНР на период 2017—2045 годы. Она предусматривает, в частности, создание многоразового корабля, работающего на ядерном ракетном двигателе.

В 2018 году появились сообщения о том, что НАСА возобновляет научно-исследовательские работы по ядерному ракетному двигателю.

Рис.3. Схема ядерного двигателя



2.3. Солнечный парус

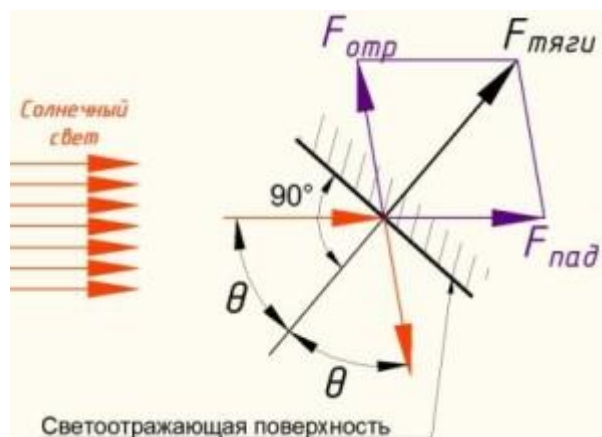
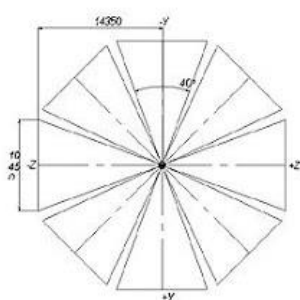
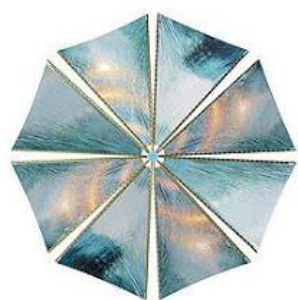
Идея полётов в космосе с использованием солнечного паруса возникла в 1920-е годы в России и принадлежит одному из пионеров ракетостроения Фридриху Цандеру, исходявшему из того, что частицы солнечного света — фотоны — имеют импульс и передают его любой освещаемой поверхности, создавая давление. Величину давления солнечного света впервые измерил русский физик Пётр Лебедев в 1900 году.

Давление солнечного света относительно мало, например, общая сила, действующая на солнечный парус 800 на 800 метров, составляет около 5 ньютонов на расстоянии Земли от Солнца. Солнечный парус может действовать в течение почти неограниченного периода времени, и совсем не требует расхода рабочего тела (топлива), и поэтому в некоторых случаях его использование может быть предпочтительно.

Первое развёртывание солнечного паруса в космосе было произведено на российском корабле «Прогресс М-15» 24 февраля 1993 года в рамках проекта «Знамя-2».

В 2001 и 2005 годах состоялось два неудачных запуска в рамках совместного российско-американского проекта по запуску солнечного парусника «Космос-1». Спутник был сконструирован в НПО имени Лавочкина по заказу Планетарного общества США.

Рис.4. Схема работы солнечного паруса



На орбите предполагалось исследовать возможности солнечного паруса в качестве тяговой системы, а также средства управления аппаратом в космосе. В случае успешного выхода на орбиту спутник должен был развернуть «солнечный парус», состоящий из восьми лепестков общим диаметром 30 метров (площадь – 600 кв.м.).

В 2010 году Японское космическое агентство запустило космический аппарат IKAROS, который оснащён солнечным парусом из тончайшей мембраны размером 14 на 14 метров по длине и ширине. С его помощью предполагается исследовать особенности движения аппаратов при помощи солнечного света.

В 2019 году космический зонд LightSail 2 (США) развернул свой солнечный парус на околоземной орбите, который состоит из четырех треугольных лепестка квадратного паруса. Их общая площадь составляет 32 квадратных метра, а сторона — чуть больше пяти метров.

В настоящее время на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана существует проект «Парус-МГТУ», который ставит своей целью запуск космического микроаппарата массой 1кг для отработки технологии развёртывания солнечного паруса с борта Российского сегмента МКС.

Солнечный парус, отрабатываемый в проекте, является бескаркасной тонкоплёночной конструкцией, жёсткость которой обеспечивается за счёт вращения паруса вокруг оси симметрии. Предложена концепция двухлопастного роторного солнечного паруса, которая обладает рядом преимуществ по сравнению с другими типами солнечных парусов – простота, возможность сворачивания паруса.

3. Применение двигателей в межпланетном космическом корабле

Какими будут космические корабли, которые будут летать к другим планетам солнечной системы?

Маловероятно, что это будут «космические ракеты», которые стартуют с поверхности земли и совершают посадку на поверхность другой планеты, как представляли это себе фантасты лет 50 назад.

3.1. Предлагаемая автором проекта схема пилотируемого межпланетного космического корабля

Скорее всего, пилотируемый межпланетный космический корабль будет собираться на орбите Земли из отдельных блоков, которые будут доставляться с поверхности Земли традиционным способом – посредством ХРД.

Межпланетный космический корабль (МКК) будет стартовать с орбиты Земли, возможно, от какого-нибудь орбитального космопорта и достигать орбиты планеты-цели. От межпланетного корабля будет отделяться посадочный модуль, который будет достигать поверхности планеты.

В качестве маршевых двигателей предполагается использовать ядерные ракетные двигатели, а в качестве корректирующих и вспомогательных двигателей – электрические (ионные или плазменные двигатели).

Однако, ЯРД опасно использовать в непосредственной близости от орбитального космопорта, поэтому в момент старта, первоначальный разгон должен осуществляться на ЭРД для исключения радиоактивного заражения. На достаточном удалении от космопорта будет включаться ЯРД.

Для защиты членов экипажа и аппаратуры МКК необходимо предусмотреть дополнительный экран радиационной защиты от ядерного ракетного двигателя.

Благодаря высокому удельному импульсу (скорости истечения) расход рабочего тела в ЭРД и ЯРД небольшой, что позволит обеспечить длительный срок активного существования МКК и его многозадачность.

Важно, чтобы посадочный модуль не был обузой для МКК, поэтому его следует оснащать двигателями с небольшой массой рабочего тела (топлива) и высоким КПД. В связи с этим разумнее всего было бы отправлять первые космические экспедиции на планеты, не имеющие своей плотной атмосферы (например, на Марс) для использования ЭРД в качестве двигателей посадочного модуля.

Сохранение привычной земной гравитации для членов экипажа обеспечивается сдвоенным гравитационным модулем, который разнонаправленно движется вокруг МКК, одновременно не придавая МКК импульс вращения.

Также в МКК предусматривается солнечный парус, однако в связи с очень малой мощностью он может быть востребован только для таких операций как коррекция маршрута МКК. Солнечный парус располагается в сложенном виде в носовой части корабля; после приведения в рабочее состояние представляет многолепестковую конструкцию с изменяемой геометрией лепестков для отражения солнечного света под разными углами.

На рисунке 5 изображена схема предполагаемого пилотируемого межпланетного космического корабля, который состоит из следующих модулей:

1. Основной (маршевый) ядерный двигатель, включающий отсек для рабочего тела (ОРТ).
2. Радиационная защита + ОРТ.
3. Блок вспомогательных ЭРД (ионных, плазменных и т.д.) + ОРТ.
4. Грузовые отсеки.
5. Рабочие и жилые отсеки, в т.ч. сдвоенный гравитационный модуль разнонаправленного вращения, который не влияет на ориентацию МКК в пространстве.
6. Причал для посадочного модуля и посадочный модуль.
7. Второй блок вспомогательных ЭРД (ионных, плазменных и т.д.) + ОРТ.

8. Солнечный парус для коррекции маршрута МКК (в сложенном состоянии).

Рис. 5. Предлагаемая автором проекта схема межпланетного космического корабля



Все три вида двигателей, предлагаемые для применения в пилотируемом МКК в настоящий момент уже существуют не только на бумаге; все они испытаны в космосе, однако, не доведены до такой степени развития и применения, как ХРД.

Причинами отсутствия развития ЭРД, ЯРД и солнечного паруса до сих пор являлись как отсутствие должного финансирования, так и то, что до настоящего момента ХРД полностью решал необходимые задачи, а именно дешёвое и качественное выведение на околоземную орбиту полезного груза.

Сейчас приоритеты изменились и надо двигаться дальше. Все предлагаемые двигатели имеют как плюсы, так и минусы и только время покажет какой из двигателей станет самым дешёвым, простым и удобным в эксплуатации.

3.2. Межпланетные зонды и их использование

Это космические корабли или «спутники» различного назначения – грузовые, спутники связи, склады и прочее.

Главным их отличием от пилотируемого МКК является отсутствие людей на борту, поэтому некоторые такие зонды обладают крайне малыми размерами и весом. Межпланетным зондам никуда не надо торопиться, поэтому для их разгона и торможения можно использовать такие маломощные «двигатели» как солнечный парус.

Также для усиления мощности в качестве двигателей зондов предполагается использование ЭРД, как обладающих малой массой.

Зонды должны стать автоматическими космическими аппаратами с возможностью управления ими с Земли, работающими продолжительное время (срок использования от 10 до 50 лет).

Первым и самым главным применением зондов станет сбор космического мусора на околоземной орбите. Проблема обломков космических аппаратов на орбите Земли и опасность, которую они представляют с каждым годом становится всё острее.

После сбора мусора Зонды могут сжигать его вместе с собой в атмосфере Земли, а могут буксировать мусор на будущие межпланетные трассы. Дело в том, что в качестве топлива (рабочего тела) для ЭРД могут (в теории) использоваться любые материалы, а с учётом того, что в «открытом космосе» любая материя дефицит, представляется целесообразным использовать Зонды для космических заправочных станций.

Такие «заправки» могут аккумулировать не только околоземный космический мусор, но и метеориты и даже небольшие астероиды, пролетающие в пределах их досягаемости.

Возможно, такой «всеядный ЭРД» будет разработан нескоро, но это обязательно случится. Кроме того, надо помнить, что вывод каждого килограмма

полезного груза в космос обходится очень дорого, поэтому сжигать в верхних слоях атмосферы будущее топливо космических кораблей нецелесообразно.

Также, в случае если ядерные реакторы для космических кораблей, не смогут стать безотказными и безопасными, Зонды могут накапливать солнечную энергию в аккумуляторах, которые затем могут меняться на использованные пролетающими мимо МКК для использования этой энергии в ЭРД.

ЭРД на космических зондах могут быть использованы для «срочных нужд» - старт с околоземной орбиты, погоня за астероидом и его торможение, выравнивание скорости с МКК, который нуждается в «заправке».

Сами Зонды после своего морального и физического износа могут становиться «космическим мусором», который будут подбирать и перерабатывать другие, более совершенные Зонды.

Заключение

Химические ракетные двигатели, использовавшиеся с момента начала космической эры, уже не подлежат заметному улучшению и для межпланетных перелётов подходят только в качестве резервных или запасных.

Человечество стоит на пороге нового этапа – освоения солнечной системы. Для этого необходимы принципиально другие двигатели для космических кораблей – электрические ракетные двигатели, ядерные ракетные двигатели и «солнечный парус».

Каждый из этих двигателей имеет свои недостатки, и только их практическое применение может выявить какой из них наиболее предпочтителен.

Для массивных пилотируемых межпланетных кораблей больше всего подходят ядерные и электрические двигатели. Однако солнечный парус также может быть использован в пилотируемом МКК в качестве корректора курса.

Для межпланетных автоматических зондов наиболее подходящими являются электрические двигатели и солнечный парус.

Наиболее перспективными могут стать двигатели, разработанные на стыке уже известных типов двигателей. Например, ядерная электродвигательная установка (разрабатывается с 2010 года в России), использующая закрытый контур ядерного реактора для питания энергией ионного двигателя (ЭРД). При этом утечки радиации в окружающую среду не происходит.

Список использованных источников

1. Дорофеев А.А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. - URL: <http://www.engineer.bmstu.ru/res/dorofeev/MAIN.HTM> (дата обращения: 15.12.2020). - Текст электронный.
2. Интервью генерального директора ФГУП «Центр Келдыша» А.С.Коротеева 03.10.2012 // Российская газета: официальный сайт. – 2012. – URL: <https://rg.ru/2012/10/03/raketa.html> (дата обращения: 17.12.2020). – Текст электронный.
3. Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина: официальный сайт. – URL: <https://www.laspace.ru/projects/planets/> (дата обращения: 21.12.2020). – Текст электронный.
4. Проект «Парус МГТУ» Молодёжного космического центра МГТУ имени Н.Э.Баумана: сайт. – URL: https://bsail.ru/?page_id=343 (дата обращения: 20.12.2020). – Текст электронный.
5. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П.Королёва: официальный сайт. – URL: https://www.energia.ru/ru/history/systems/vehicles/vehicle_vostok.html (дата обращения: 15.12.2020). – Текст электронный.
6. Салмин В.В., Петрухина К.В. «Космонавтика малых тяг» / В.В.Салмин, К.В.Петрухина // Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П.Королёва: официальный сайт. – URL: https://ssau.ru/files/resources/ump/kosmonavtika_malih_tyag.pdf (дата обращения: 20.12.2020). – Текст электронный.
7. Труды НПО «Энергомаш» имени Академика В.П.Глушко. - URL: <http://engine.space> (дата обращения: 10.12.2020). – Текст электронный.