**Космические двигатели третьего тысячелетия**

Валентин Подвысоцкий

Достижения в освоении космического пространства зависят от уровня развития двигательных систем. Определяющим фактором эффективности двигателей космических аппаратов, являются их энергетические характеристики. По виду используемой энергии двигательные установки подразделяются на четыре типа: термохимические, ядерные, электрические, солнечно-парусные. В настоящее время основой космонавтики являются мощные термохимические двигатели. Электрические и ядерные установки находятся на стадии развития, и в будущем смогут найти широкое применение в космической технике. То же можно сказать и о солнечно-парусных двигателях и других перспективных силовых установках.

В данной статье рассматривается новый тип двигателей, работающих на кинетической энергии космического аппарата (или встречного потока вещества, в зависимости от выбора системы координат). Принцип действия двигателя основан на захвате и торможении встречного потока вещества. Захваченное вещество попадает внутрь двигателя. В результате его торможения, выделяется энергия. Часть этой энергии, тем или иным образом, может быть использована для ускорения бортовых запасов реактивной массы. При определенных условиях, реактивная сила тяги превышает силу торможения, и космический аппарат увеличивает скорость полета. Скорость космического аппарата возрастает, а его масса, импульс и кинетическая энергия уменьшаются (в соответствии с законами сохранения).

Возможны различные варианты двигательных установок нового типа. Например, кинетический двигатель, в котором происходит непосредственное преобразование части кинетической энергии встречного потока газа в энергию рабочего тела. Этот двигатель состоит из следующих, объединенных в одно конструктивное целое частей:

массозаборника, и диффузора, для торможения захваченного газа;

камеры, в которой нагретый, вследствие торможения, до очень высокой температуры газ смешивается с рабочим телом;

реактивного сопла, через которое, расширяясь, истекает полученная смесь.

Кинетический двигатель может использоваться при полетах в атмосфере планет-гигантов. Предположим, космический аппарат летит в верхних слоях атмосферы Урана, со скоростью 20км/с. Космический аппарат находится в аэродинамической тени раструба массозаборника. Через массозаборник, внутрь двигателя попадает 1кг водорода. Его кинетическая энергия 200тыс.кДж, импульс 20тыс.кг∙м/с. КПД двигателя 70%. В результате торможения захваченного газа, его кинетическая энергия преобразуется в тепловую энергию. Чтобы получить максимальную удельную тягу, расход рабочего тела должен составлять 2,422кг. Раскаленный водород смешивается с рабочим телом, и образовавшаяся смесь в количестве 3,422кг, истекает через реактивное сопло. Ее кинетическая энергия 140тыс.кДж, скорость истечения 9045м/с, импульс 30955кг∙м/с. Если разницу импульсов (10955кг∙м/с), разделить на расход рабочего тела (2,422кг), получим эффективную скорость истечения 4523м/с. Если разделить эффективную скорость истечения на коэффициент 9,81м/с², получим удельную тягу 460с.

Эффективность массозаборника значительно увеличится, если снабдить двигатель источником магнитного поля (соленоидом). Движение частиц плазмы поперек силовых линий магнитного поля затруднено, и магнитное поле играет роль воронки, направляющей потоки заряженных частиц в двигатель. В результате, эффективное сечение массозаборника может возрасти в тысячи раз. Кроме того, появится дополнительный энергетический эффект. Магнитная воронка играет роль своеобразного фильтра, направляя в двигатель лишь обладающие значительной энергией ионизированные частицы. Внутри двигателя ионизированный газ смешивается с рабочим телом. Происходит торможение и рекомбинация захваченных частиц, выделяется значительное количество тепла. Таким образам, бортовые запасы рабочего тела будут нагреваться не только за счет кинетической энергии захваченного газа, но и за счет его химической энергии. Поскольку, образовавшаяся газовая смесь состоит в основном из нейтральных частиц, магнитное поле двигателя не будет препятствовать ее истечению через реактивное сопло.

Кинетический двигатель, оснащенный магнитной воронкой, может использоваться при полетах в атмосфере планет земной группы. На высоте около 300км над Землей, концентрация ионизированных частиц достигает максимального значения (примерно 1млн ионов кислорода в 1см³). Для захвата ежесекундно 1кг плазмы, при скорости полета 8км/с, нужна магнитная воронка диаметром около 110км. Создание такой воронки, связано с определенными трудностями. Впрочем, плотность плазмы значительно возрастает в периоды активности Солнца. Кроме того, можно применять искусственные источники плазмы. Во многих случаях, достаточно использовать магнитную воронку значительно меньшего диаметра.

С целью исследования магнитного поля Земли, проводились опыты по созданию искусственной кометы. Спутник ИРМ, созданный институтом им. Макса Планка, выпустил на высоте 110 тысяч километров, облако заряженных частиц бария. Облако сначала было зеленым, а через полминуты стало фиолетовым за счет ионизации под действием солнечных лучей. Через 8 минут от облака протянулся хвост на 20 тысяч километров, а скорость частиц бария под давлением солнечных лучей достигла несколько десятков километров в секунду. Возрастание плотности газа, повысит эффективность магнитной воронки. Кроме того, под давлением солнечных лучей, возрастает скорость и энергия поступающего в двигатель газа. Этот способ целесообразно применять на околоземных орбитах, и в центральных областях Солнечной системы.

Следующий способ заключается в использовании раскаленных газов, выброшенных из реактивного двигателя, установленного на другом космическом аппарате. Можно организовать полет таким образом, чтобы космические аппараты двигались навстречу друг другу. Подобная схема может использоваться для доставки грузов на околоземную орбиту. Предположим, на околоземной орбите движется космическая станция, выбрасывая перед собой поток плазмы. Космический аппарат доставляется многоразовым носителем на заданную высоту, и начинает двигаться навстречу потоку плазмы, с помощью кинетического двигателя. Носитель возвращается на Землю.

Ставиться задача, увеличить скорость космического аппарата с 0км/с до 8км/с. Скорость космической станции 8км/с, скорость истечения плазмы 10км/с. В результате сложения скоростей, скорость поступающей в двигатель плазмы возрастает с 18км/с до 26км/с. При КПД кинетического двигателя 70%, и оптимальном режиме его работы, масса космического аппарата уменьшится со 100т до 20т. Масса рабочего тела 80т, объем 40м³ (при плотности 2000кг/м³).

Предположим, продолжительность разгона 400 секунд, средний расход бортовых запасов рабочего тела 200кг/с. Ракетный двигатель космической станции в среднем должен расходовать не менее 83кг/с массы. При скорости истечения 10км/с это соответствует мощности более 4млнкВт. Для создания потока плазмы такой мощности, может использоваться термоэлектрический двигатель, с солнечной или ядерной энергоустановкой. По некоторым оценкам, удельная масса таких систем, примерно 1кг/кВт. Таким образом, масса космической станции составит не менее 4000т. Если полезная нагрузка космического аппарата 5т, такая транспортная система обеспечит грузопоток порядка 500т в сутки (с учетом того, что половина ресурсов массы и времени, расходуется на коррекцию орбиты станции).

Для многократного использования кинетических двигателей, необходимо создать недорогой атмосферно-космический аппарат, способный возвращаться на Землю. Его возвращение можно организовать таким образом, чтобы аэродинамическая сила была направлена к центру Земли, препятствуя преждевременному выходу аппарата из атмосферы. Аппарат сможет сделать несколько витков вокруг Земли, двигаясь на оптимальной высоте в верхних слоях атмосферы, со скоростью значительно превышающей первую космическую. При этом избыток тепла будет отводиться за счет излучения, скорость полета постепенно уменьшится, без перегрузок и перегрева конструкции. Это позволит упростить теплозащиту, снизить необходимый запас прочности. В результате уменьшится масса и стоимость атмосферно-космического аппарата, увеличится срок его службы. После погашения избыточной скорости полета, нужно направить аэродинамическую силу в противоположном направлении. Это можно осуществить за счет поворота аппарата вокруг продольной оси на 180°, или путем изменения геометрии его несущих поверхностей (крыльев).

Указанный выше грузопоток, значительно превышает потребности ближайшего будущего. Вероятно, реализация таких транспортных систем сможет осуществляться в рамках программ космической энергетики. Основная задача заключается в создании потока плазмы (а не передвижении космической станции пространстве). Поэтому, большая масса и размеры энергоустановки и ракетного двигателя, не являются непреодолимым препятствием. Более серьезная проблема пополнение запасов массы. При грузопотоке 500т затраты массы на создание потока плазмы, составляют более 7000т. Впрочем, если доставлять массу с Луны, затраты на ее транспортировку составят не более 15...20% общих затрат энергии.

Интересный способ разгона с использованием реактивной струи, полет в кильватере другого космического аппарата, на оптимальном расстоянии. Такой полет возможен, если «ведущий» аппарат оснащен ракетным двигателем, со скоростью истечения газов десятки километров в секунду. Лишь в этом случае кинетический двигатель, установленный на «ведомом» космическом аппарате, будет развивать достаточно высокую удельную тягу. Захваченный газ состоит из частиц с высокой степенью ионизации, при рекомбинации которых выделяется большое количество дополнительной энергии. Следовательно, при скорости захваченного газа 20км/с, максимально возможная удельная тяга кинетического двигателя значительно выше 460с (при КПД 70%).

Кроме кинетического двигателя, возможны другие варианты двигательных установок нового типа. Например, двигатель ЭОЛ. Этот двигатель состоит из массозаборника, МГД-генератора и электрореактивного движителя. Принцип действия следующий. Захваченный магнитной воронкой ионизированный газ проходит через канал МГД-генератора и, через реактивное сопло, вытекает наружу. При частичном торможении газа в канале МГД-генератора, вырабатывается электрический ток, который приводит в действие реактивный движитель и все бортовые системы. Сила тяги электрореактивного движителя, превышает силу, возникающую в результате торможения газа внутри канала МГД-генератора. В результате, космический аппарат будет увеличивать скорость полета, отбрасывая часть своей массы.

Чтобы получить наибольшую удельную тягу, отработанный газ должен истекать из реактивного сопла со скоростью, равной скорости истечения рабочего тела из реактивного движителя. Для создания силы тяги целесообразно использовать термоэлектрические движители. В таких движителях электрический ток нагревает рабочее тело до высокой температуры, в результате скорость истечения может достигать несколько десятков километров в секунду. Регулируя температуру рабочего тела, можно регулировать скорость его истечения. Кроме того, термоэлектрический движитель развивает значительную силу тяги.

Плотность межпланетной среды переменная величина, и может колебаться в очень широких пределах. При незначительной плотности около 10–17кг/м³, эффективность входного устройства будет низкой. Чтобы обеспечить поступление ежесекундно около 1кг плазмы, при скорости полета 50км/с, нужна магнитная воронка диаметром около 1600км. Создание подобного устройства весьма проблематично. Очевидно, в межпланетном пространстве применение двигателя ЭОЛ будет возможным, лишь при наличии соответствующих благоприятных обстоятельств. Эти обстоятельства, могут возникать в результате различных космических процессов, или создаваться искусственным путем.

При прохождении ядра кометы вблизи Солнца, образуется газово-пылевое облако. Газы, из которых оно состоит, ионизируются под действием солнечных лучей и могут быть захвачены магнитной воронкой. Кроме твердого ядра размером 10...50км, в строении комет выделяют газово-пылевую оболочку (размеры достигают иногда 2млн км), и хвост (он простирается иногда на 150млнкм). Если большие и малые планеты вращаются вокруг Солнца в одном направлении, то кометы не придерживаются никаких правил. В частности, комета Галлея движется практически навстречу Земле. Во время очередного прохождения кометы Галлея вблизи Солнца в марте 1986 года, автоматические межпланетные станции «Вега-1» и «Вега-2» пролетели на расстоянии всего несколько тысяч километров от ядра, через плотную газово-пылевую оболочку со скоростью около 80км/с.

Предположим, средняя плотность плазмы в газово-пылевом облаке 10–14кг/м³. Магнитная воронка диаметром около 40км, обеспечит ежесекундно поступление 1кг плазмы. При скорости 80км/с, кинетическая энергия 1кг плазмы 3200тыс.кДж. При общем КПД системы «магнитная воронка – МГД-генератор» 70%, получим 2240тыс.кДж электрического тока. Из них 50тыс.кДж, расходует холодильная установка. Остальные 2190тыс.кДж расходует электрореактивный движитель. При КПД движителя 70%, кинетическая энергия реактивной струи составит 1533тыс.кДж. Допустим, струя реактивного движителя истекает со скоростью 25740м/с, ее масса 4,628кг (импульс ускорения 119125кг∙м/с). Захваченная плазма проходит через канал МГД-генератора, и вытекает в межпланетное пространство со скоростью 25740м/с, ее масса 1кг (импульс торможения 54260кг∙м/с). Если разделить приращение импульса (64865кг∙м/с) на расход бортовых запасов реактивной массы (4,628кг), получим эффективную скорость истечения (14016м/с). Если разделить эффективную скорость истечения, на коэффициент 9,81м/с², получим удельную тягу 1430с. Тяговое усилие двигательной системы 6618кг.

Принимая массу космического аппарата равной 500т, получаем ускорение 0,130м/с². Если протяженность газово-пылевого облака 1млн км, продолжительность работы двигательной установки примерно 210 минут (при относительной средней скорости полета 80км/с). Общее приращение скорости составит лишь 1625м/с. Тяговое усилие двигательной установки (ускорение космического аппарата) можно значительно увеличить, за счет некоторого снижения удельной тяги. Простой расчет показывает следующее. Если увеличить ежесекундный расход бортовых запасов реактивной массы в 10 раз (46,28кг/с), удельная тяга уменьшится в 2,1 раза (670с). Тяговое усилие возрастет в 4,7 раза (31000кг). Ускорение космического аппарата составит 0,608м/с², общее приращение скорости около 7600м/с.

В процессе работы двигательной установки, нужно обеспечить отвод от всех ее частей, определенного количества тепловой энергии. Предположим, эта энергия равна 160тыс.кДж (или 5% кинетической энергии захваченной плазмы). В космическом пространстве отвод тепла возможен только излучением (энергетическая светимость пропорциональна четвертой степени температуры). Если температура излучающей поверхности будет равна 400К, площадь излучающей поверхности составит 110тыс.м². Таким образом, система отвода тепла если не самая тяжелая, то самая громоздкая часть энергоустановки. Кроме того, высокая вероятность попадания метеоритов, что может нарушить нормальную работу системы. Большие размеры вынуждают увеличивать скорость движения теплоносителя, что ограничивает размеры излучающей поверхности, а значит и мощность энергоустановки.

В двигателе ЭОЛ проблема отвода тепла решается значительно более эффективно. Такая возможность появляется в результате прямого (непосредственного) преобразования энергии, которое составляет главную особенность МГД–генератора, отличающую его от электромашинного генератора. Части двигателя ЭОЛ, работают при разной температуре. Наименее горячая часть это соленоид магнитной воронки, несколько выше температура МГД-генератора, и наиболее горячая часть это термоэлектрический движитель. Поток теплоносителя можно направить сначала для охлаждения более холодных, потом более горячих частей двигательной системы, по маршруту: магнитная воронка – МГД-генератор – термоэлектрический движитель.

Предположим, в конце цикла охлаждения (при выходе из охладительной рубашки термоэлектрического движителя), температура теплоносителя равна 1200К. Площадь излучающей поверхности составит 1360м². Ее можно дополнительно уменьшить с помощью холодильной установки. При затратах энергии 50тыс.кДж, холодильная установка увеличит температуру теплоносителя до 1575К (без учета КПД холодильной установки). Суммарная энергия теплового излучения составит 210тыс.кДж (160тыс.кДж + 50тыс.кДж), площадь излучающей поверхности уменьшится до 600м².

Возникновение достаточно большого (с высокой плотностью плазмы) газово-пылевого облака, довольно редкое явление. Приведенный выше пример служит в основном для иллюстрации возможностей двигателя ЭОЛ. Более благоприятные условия для его постоянного применения, в системах планет-гигантов. Плотность газа в системе планет-гигантов заведомо выше, чем за ее пределами. Первая космическая скорость для Юпитера около 60км/с. Поскольку удельная тяга двигателя ЭОЛ прямо пропорциональна скорости полета, ее максимально возможное значение (при КПД 70%), составит не менее 1070с (1430с∙60/80). Что касается ускорения космического аппарата (которое зависит от плотности окружающей плазмы и диаметра магнитной воронки), при полетах в системах планет-гигантов, его величина не имеет решающего значения. Космический аппарат не сможет покинуть систему планеты-гиганта, прежде чем получит вторую космическую скорость.

Конечной целью систематических полетов к различным космическим объектам, является освоение этих объектов. В отдаленном будущем, здесь можно расположить и использовать для формирования потока плазмы, электрические ракетные двигатели (ЭРД). На космических базах искусственного или естественного происхождения, могут работать ЭРД практически любой мощности. Например, на поверхности Луны можно построить ядерную или солнечную электростанцию, и расположить нужное количество ЭРД различного типа. С их помощью, космический аппарат сможет осуществить посадку на Луну, взлет с Луны в космическое пространство.

Эти маневры могут осуществляться практически без затрат бортовых запасов рабочего тела; небольшие расходы рабочего тела понадобятся лишь для стабилизации положения космического аппарата в пространстве, и коррекции его курса. Такой результат, достигается при достаточно большой мощности МГД-генератора, когда сила, возникающая в результате торможения потока плазмы, превышает силу притяжения Луны. При недостаточной мощности МГД-генератора, вырабатываемый электрический ток будет приводить в действие реактивный движитель. В этом случае, космический аппарат осуществит взлет и посадку, с использованием бортовых запасов рабочего тела. Сила, возникающая в результате торможения плазмы, и сила тяги электрореактивного движителя, будут действовать в одном направлении.

ЭРД с небольшой скоростью истечения рабочего тела (электротермические) обеспечат запуск космических аппаратов с поверхности Луны, полеты с Луны на Землю и обратно, посадку на поверхность Луны. ЭРД с большой скоростью истечения рабочего тела (электромагнитные; электростатические), будут использоваться главным образом для обеспечения особо сложных и дальних космических полетов.

Для создания потока плазмы, ЭРД можно расположить на поверхности тех небесных тел Солнечной системы, которые вследствие небольшой силы тяжести не имеют плотной атмосферы. Это наименьшие планеты Меркурий, Марс и Плутон, естественные спутники более крупных планет, а также астероиды и кометы. Освоение всех планет Солнечной системы может осуществляться с помощью таких ракетно-космических комплексов, как на Луне. Единственное исключение Венера, у которой плотная атмосфера и нет естественных спутников.

В межпланетном пространстве, нужны другие источники поступления вещества: искусственная комета, реактивная струя космического аппарата, ядерный взрыв и т.д. Если на борту космического аппарата расположить ядерные заряды, с их помощью можно совершать любые маневры и передвижения. При необходимости, ядерное взрывное устройство подрывается на оптимальном расстоянии от космического аппарата. Для уменьшения скорости образовавшейся в результате взрыва плазмы, взрывное устройство снаряжается балластными веществами. Их количество должно быть таким, чтобы в результате взрыва не образовались твердые частицы. Или нужно использовать систему уничтожения (отклонения) метеоритов. Появляется реальная возможность пополнить запасы массы за счет практически любых материалов. На борту можно хранить лишь ядерные заряды, а запасы балластных веществ пополнять во время экспедиции (практически на любом космическом объекте).

Ядерные взрывные устройства можно предварительно расположить вдоль траектории полета космического аппарата. При этом не придется разгонять массу самих взрывных устройств. Взрыв происходит по специальному сигналу, когда космический аппарат пролетел вблизи взрывного устройства, и удалился от него на некоторое расстояние. Продукты взрыва (плазма с высокой плотностью), захватываются магнитной воронкой. Сила, возникающая при торможении захваченной плазмы в канале МГД-генератора, и сила тяги электрореактивного движителя, могут действовать в одном направлении (такой же результат можно получить, используя другие искусственные источники). Основная проблема при использовании взрывных устройств, неравномерность получаемого потока плазмы. Для более эффективной работы двигателя ЭОЛ, может понадобиться мощный бортовой аккумулятор электрического тока.

Если удастся решить возникающие проблемы, скорость космического аппарата будет определяться лишь количеством взрывных устройств. Взрывные устройства могут состоять из унифицированного ядерного (термоядерного) заряда, и оболочки различной массы. За счет этого, образовавшаяся плазма будет двигаться с различной скоростью при каждом взрыве. Полет организуется так, чтобы в момент пролета аппарата возле каждого взрывного устройства, образовавшийся в результате взрыва поток плазмы двигался относительно аппарата с определенной оптимальной скоростью.

Допустим, космический аппарат массой 10т, разгоняется до скорости 20тыс.км/с. При каждом взрыве, плазма двигается относительно аппарата, со средней скоростью 1100км/с. В канале МГД-генератора, ее скорость уменьшается до 100км/с. С учетом возрастания скорости аппарата от 0км/с до 20тыс.км/с, среднеквадратическая скорость плазмы примерно 12тыс.км/с. Если не учитывать тягу электрореактивного движителя, для разгона аппарата необходимо пропустить через канал МГД-генератора около 200т плазмы. Взрыв может быть организован таким образом, чтобы основная масса плазмы двигалась в двух противоположных направлениях. Если космический аппарат находится на расстоянии, равном диаметру магнитной воронки, количество захваченной плазмы может достигать 50%. Таким образом, суммарная масса взрывных устройств не менее 400т. С учетом среднеквадратической скорости, суммарная энергия взрывов 2,88∙1016кДж (в тротиловом эквиваленте 6,9тыс. Мт).

В настоящее время человечество обладает достаточным потенциалом для производства взрывных устройств указанной суммарной мощности. К концу 1980 года, по оценкам экспертов ООН, суммарная мощность ядерного оружия в мире составляла 13тыс. Мт. Очевидно, в обозримом будущем, появится возможность размещения вдоль траектории полета космического аппарата более 400т груза. Очередь за созданием двигателя ЭОЛ с достаточно высокими характеристиками. Возникающие при этом технические проблемы значительно меньше, чем при создании любого другого двигателя аналогичного назначения. Есть основания считать, что стоимость запуска межзвездного аппарата с помощью двигателя ЭОЛ, может оказаться наиболее низкой среди всех конкурирующих схем.