

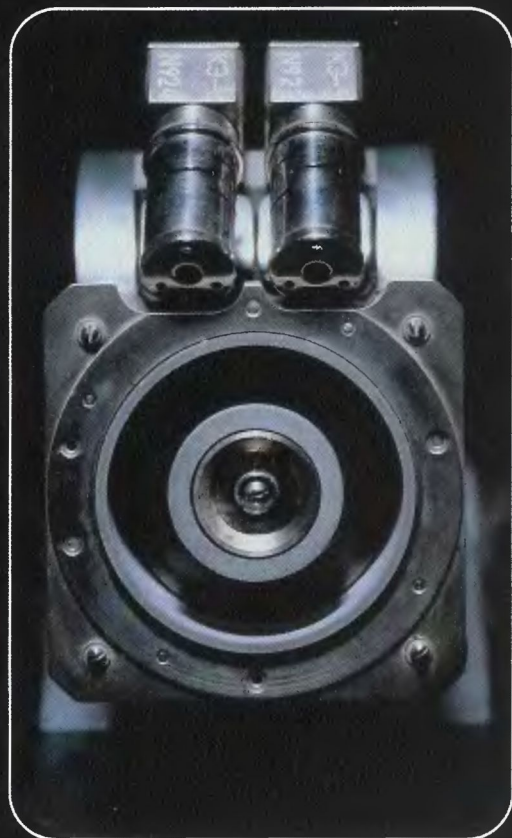
ПОТОМКИ ПОВЕЛИТЕЛЯ ВЕТРОВ

В следующем году исследованиям в области электроракетных двигателей (ЭРД) исполняется сто лет. Самые перспективные среди ЭРД – плазменные – разработаны и производятся в России

“Метеор-10”, выведенный 29 декабря 1971 года на условно-синхронную орбиту (что позволяло проходить над одними и теми же точками земной поверхности через определенные интервалы времени) был самым обычным метеоспутником. Но только на первый взгляд: на его борту кроме обычной системы ориентации стояли еще два экспериментальных двигателя. Один из них, носящий имя

ПЛАЗМА

греческого бога западного ветра – “Зефир”, проработал всего около часа и дальнейшего развития не получил. А вот второй, названный в честь повелителя ветров – “Эол-1”, разработанный группой сотрудников ИАЭ (Института атомной энергии) под руководством Алексея Ивановича Морозова и изготовленный калининградским ОКБ “Факел”, положил начало целому космическому направлению – плазменным двигателям.

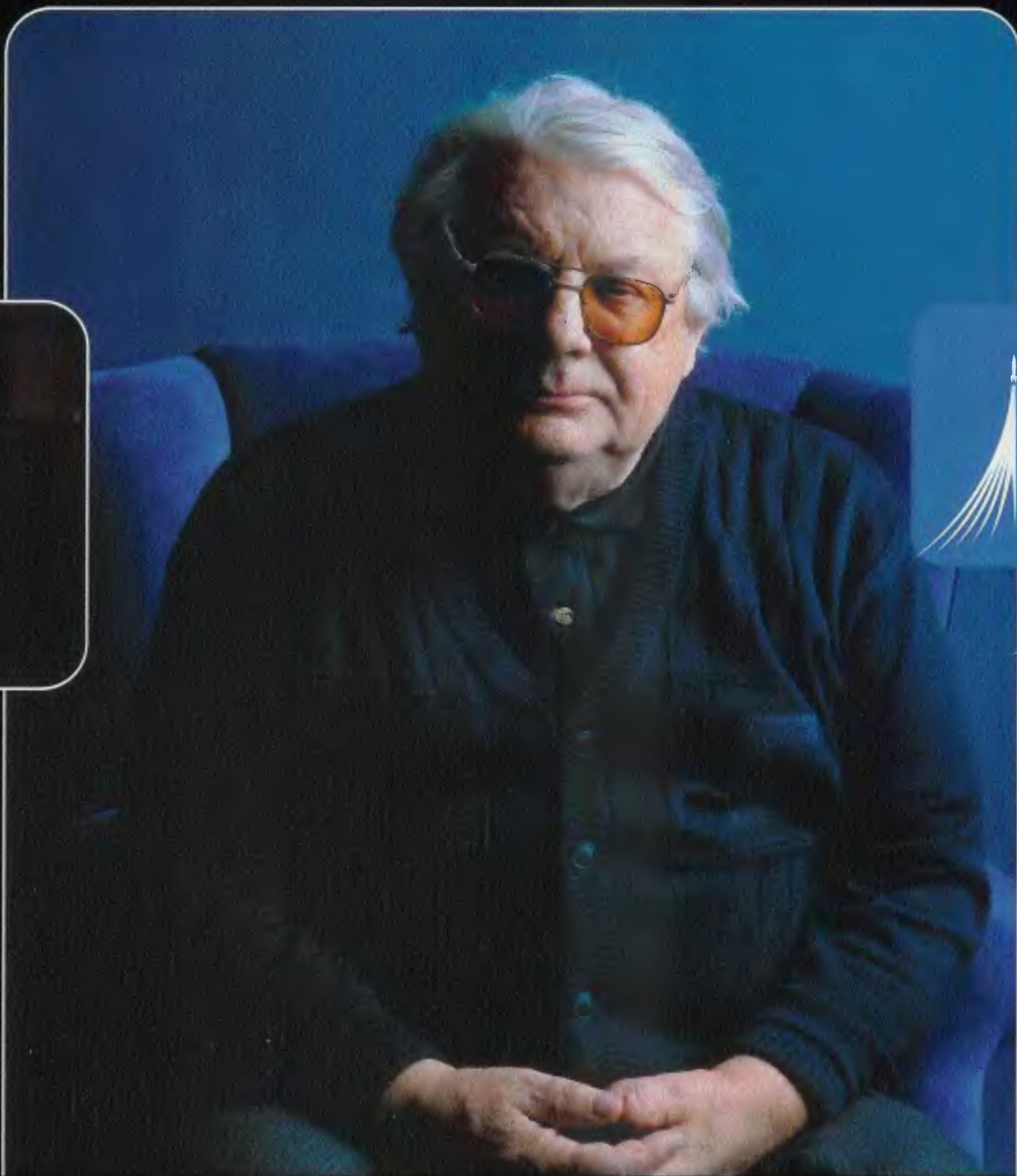
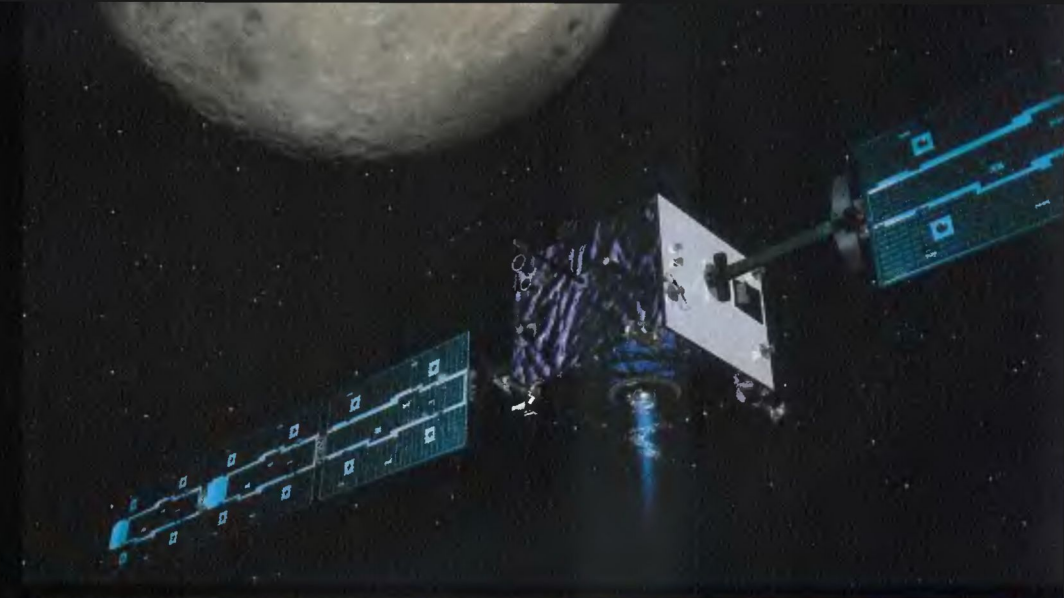


Учитель физики

История плазменных двигателей началась в 1950 году, когда выпускника физфака МГУ Алексея Морозова партком распределил преподавать механику и электротехнику в техникуме заводского поселка Людиново на юго-востоке Калужской области. Причина проста: отец Морозова был репрессирован и никто не принимал во внимание ни его специализацию (квантовая теория поля), ни неоднократные просьбы его научного руководителя – декана физфака Арсения Александровича Соколова – оставить его на кафедре.

Преподавателей физики в те годы довольно часто просили выступать с лекциями об атомной энергии, и Морозов не стал исключением. В один из дней 1953 года он возвращался в Людиново с подобной лекции в деревне Черный

поток. “Незадолго до этого я прочитал книжку Гудмана об основах ядерной энергетики. Там была схема ядерной ракеты – газ проходил сквозь активную зону и разогревался. Меня поразило, насколько неэффективна эта конструкция – с одной стороны, атомная энергия, а с другой – это ведь просто тепловая машина! – вспоминает Алексей Иванович. – И пока я шел 12 км по шпалам до Людиново, я вспомнил эксперименты с силой Ампера и катушкой Томсона, которые я показывал студентам в училище, и мне пришла в голову идея – почему бы не разогнать рабочее тело магнитным полем?” Теоретические выкладки показывали, что это вполне возможно, и Морозов решил провести эксперимент.



ПИОНЕРЫ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОГО СТОЛЕТИЯ

В этом году Американское общество по электроракетным двигателям (Electric Rocket Propulsion Society, ERPS) решило отметить столетие исследований в данной области (1906–2006) и учредило специальную награду – медаль “За выдающиеся достижения в области электроракетных двигателей”. Алексей Иванович Морозов оказался среди первых шести награжденных. Остальные пять – это Е. Стулингер, Г. Кауфман и Р. Ян (США), Г. Лёб (Германия) и К. Курики (Япония)

Изготовив из асбоцемента “кирпичик”, он просверлил в нем крест-накрест два отверстия. В одно он с разных сторон вставил два угольных стержня от батареек, а сверху и снизу бруска расположил два полюса мощного электромагнита. В обычном состоянии плазма, образующаяся в процессе горения дуги, с легким шипением вылетала с обеих сторон второго отверстия, но стоило включить электромагнит – и поток стал бить в одну сторону со страшным ревом.

В 1955 году Морозов написал статью “О возможности создания плазменных электрореактивных двигателей”, но его научный руководитель, прочитав ее, дал хороший совет: “Такую статью сразу же засекретят. Лучше изменить название на что-нибудь более нейтральное”. В результате в ЖЭТФ (Журнал экспериментальной и теоретической физики) статья вышла под названием “Об ускорении плазмы магнитным полем”. Рецензировал ее глава отдела плазменных исследований ИАЭ Лев Арцимович. Теория, изложенная в статье Морозова, позднее нашла свое отражение в статье самого Арцимовича о рельсотроне (только у Морозова магнитное поле было постоянное, а у Арцимовича – электродинамическое). Публикация вызвала среди специалистов большой резонанс, ее даже дважды обсуждали на заседании Американского физического общества.

Летим к Марсу

В 1955 году Морозов защитил диссертацию, а в 1957-м его пригласили на работу в ИАЭ. К концу 1950-х успехи СССР в космосе вдохновили конструкторов замахнуться на несколько крупномасштабных космических проектов. Планировался даже полет к Марсу, и поэтому 2 июля 1959 года Лев Арцимович созвал сотрудников на совещание. Темой обсуждения была возможность построения двигателей для марсианского корабля. Арцимович предложил для такой системы следующие характеристики: тяга около 10 кгс, скорость истечения 100 км/с при мощности двигателя 10 МВт. Сотрудники ИАЭ предложили несколько проектов: плазменный импульсный двигатель (А.М. Андрианов), магнитно-плазменный аналог сопла Лавала (А.И. Морозов) и двигатель на основе одноцелевого источника ионов, практически такого же, какой применялся для электромагнитного разделения изотопов (Павел Матвеевич Морозов, однофамилец Алексея Ивановича).

Кстати, все эти проекты в том или ином виде позднее были реализованы. Плазменно-эрозионный (вариант импульсного) двигатель Андрианова значительно меньшей мощности был установлен на один из спутников и выведен в космос в 1964 году, а ионный двигатель П.М. Морозова под именем “Зефир” (тоже маломощный) стоял на том самом спутнике “Метеор-10”. Эксперименты с магнитным аналогом сопла Лавала с центральным телом (сами разработчики называли его “коаксиал”) велись с 1960 года, но схема оказалась сложной, и построен он был лишь в 1980 году совместными усилиями ИАЭ, Харьковского физико-технического института, ТРИНИТИ и Института физики Белоруссии. Мощность этого монстра составила 10 ГВт!

Однако эти проекты не подходили для марсианской программы по одной простой причине: у конструкторов

тогда не было источников питания подходящей мощности. Эта проблема актуальна и сейчас: максимум, на который можно рассчитывать, это десятки киловатт. Нужно было переходить к мелкому масштабу.

Мелкий масштаб

Георгий Гродзовский (ЦАГИ) одним из первых стал конструировать маломощные электроракетные двигатели у нас в стране. Начиная с 1959 года его ионные двигатели испытывались в космосе (правда, не на спутниках, а на баллистических ракетах). В 1957 году М.С. Иоффе и Е.Е. Юшманов начали исследования магнитной (так называемой пробочной) ловушки для плазмы. Для заполнения ее горячей плазмой (10 млн. градусов) они использовали ускорение ионов в скрещенных электрических и магнитных полях. Эта работа послужила фундаментом для создания ряда плазменных двигателей. В 1962 году Алексей Морозов предложил свою конструкцию плазменного двигателя малой мощности, названного СПД (стационарный плазменный двигатель). Принципиально важной особенностью СПД было то, что величина магнитного поля нарастала к срезу канала двигателя – это обеспечивало создание в плазме объемного электрического поля. Вся идея двигателя была построена именно на существовании такого поля.

“Впервые на возможность существования объемных электрических полей в плазме указал в 1910 году Таунсенд, однако на протяжении 50 лет попытки создать такое поле были неудачны. В то время считали, что, поскольку плазма является проводником – поле в ней создать нельзя. Существует даже формула Бома для проводимости плазмы – правда, если следовать ей, ни термояда, ни СПД создать нельзя! – смеется Морозов. – Но тогда мне никто не верил. Когда я начинал говорить о распределенных электрических полях, меня буквально выгоняли из комнаты. Были и совершенно анекдотичные ситуации. В 1973 году я послал статью в журнал ‘Физика плазмы’, где были описаны распределенные поля в СПД. Мне пришлось два совершенно разгромных отзыва, в обоих заявлялось, что я не знаю элементарных вещей: создать электрическое поле в плазме невозможно. А ведь к тому времени с момента, как ‘Эол-1’ слетал в космос и доказал свою эффективность, прошло уже больше года!” На самом деле создать объемное электрическое поле в плазме без магнитного поля действительно нельзя – за счет свободных электро-

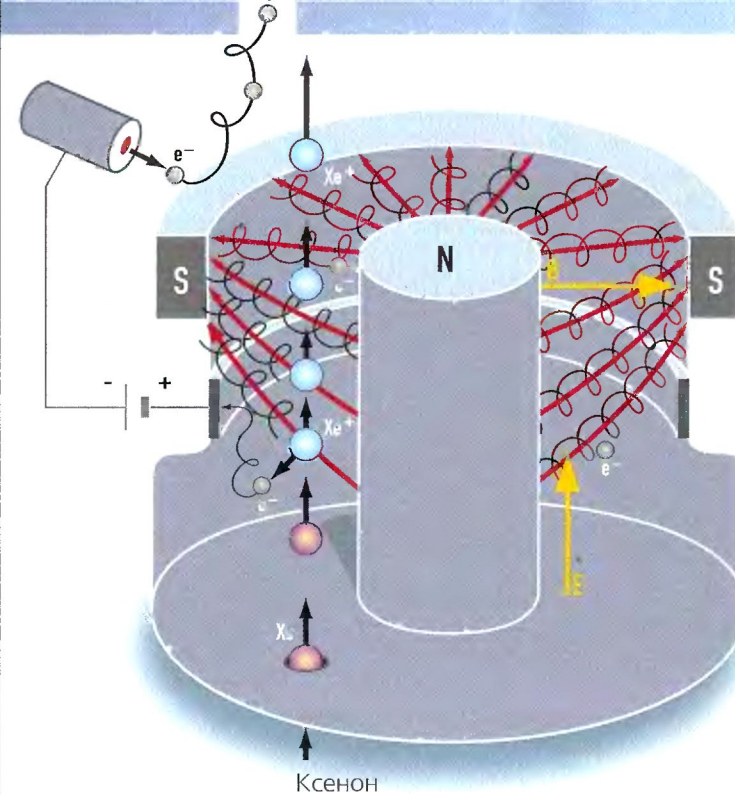
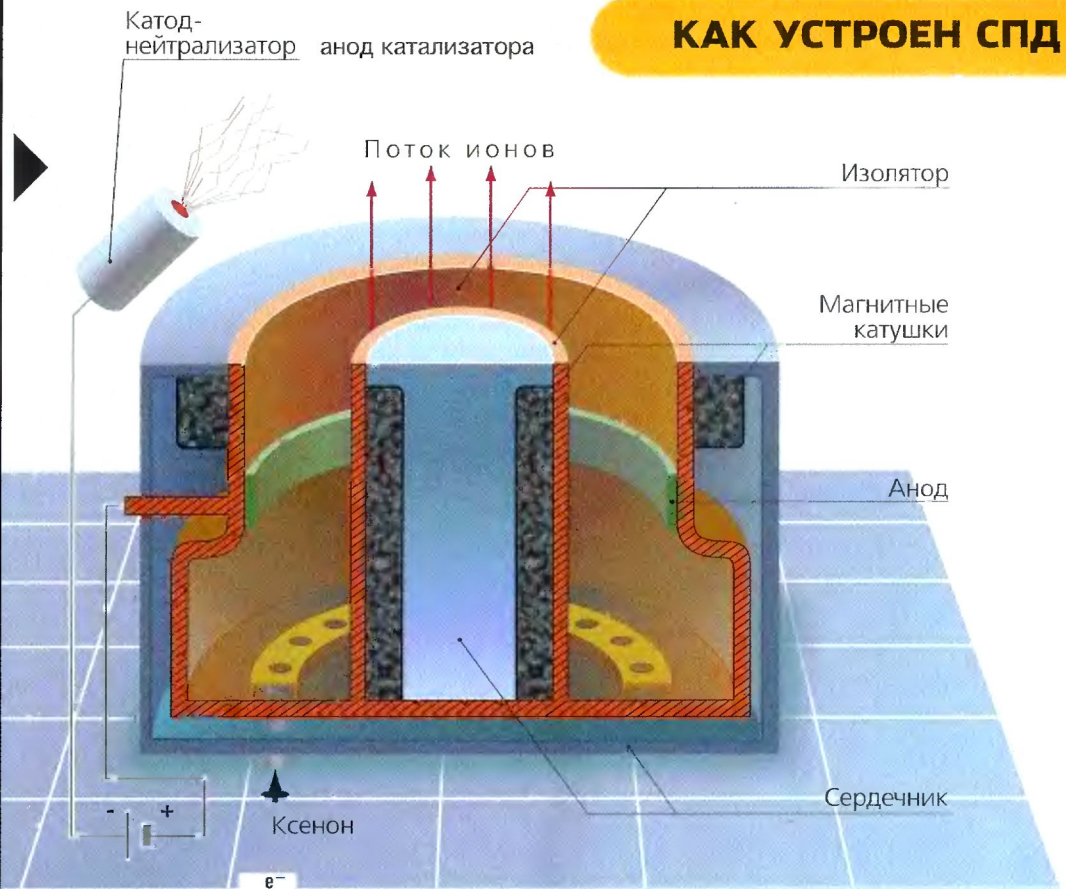


Простейшие электроракетные двигатели разогревают газ перед истечением электрической дугой (арк-жеты) или раскаленной током проволокой – резистоджеты (применялись на “Метеорах”). Встречаются они и в наше время – их конструкция проста, дешева и надежна. Правда, КПД, скорость истечения и тяга невелики.

Пионером ионных двигателей считается американец Г. Кауфман. В его схеме используется ионизация дугowym разрядом, а ионы затем разгоняются электростатическим полем в ионно-оптической системе. Для увеличения тяги Кауфман использовал электростатические решетки с множеством отверстий (см. схему слева). Решетки под действием теплового расширения склонны деформироваться. Поэтому конструкторы используют специальные материалы и системы компенсации. Подобные двигатели стоят очень дорого. Наличие большого объемного заряда между разгоняющими решетками приводит к экранировке ионами потенциала катода и создает “пробку”. Для создания большого тока нужна высокая напряженность поля, но она имеет границы – может возникнуть пробой. Если же поместить в ускоряющий промежуток квазинейтральную плазму, поле начнет ускорять в основном легкие электроны, которые не создают тяги.

В плазменном двигателе электроны “привязаны” магнитным полем, перпендикулярным электрическому. Они “навиваются” на магнитные силовые линии, образуя дополнительные “прозрачные” электроды. Тяжелые ионы почти не чувствуют магнитного поля, разгоняются электрическим полем этих электродов и с большой скоростью выбрасываются из двигателя.


В основе ионного двигателя лежит простой физический принцип (на уровне школы), но конструкция двигателя очень сложна. В основе плазменного – сложная физическая теория, но сам двигатель прост в изготовлении, надежен и лишен недостатков ионного.



ПРИНЦИПЫ СПД

СПД – это кольцевой электромагнит, в зазор которого помещена камера из керамики. В торце камеры расположен анод. Снаружи, возле среза канала двигателя, – два катода-нейтрализатора (рабочий и резервный). Рабочее вещество (ксенон) подается в камеру и вблизи анода ионизуется. Ионы ускоряются в электрическом поле и вылетают из двигателя, создавая реактивную тягу. Их объемный заряд нейтрализуется электронами, подаваемыми с катода-нейтрализатора (если этого не сделать, спутник будет приобретать отрицательный электрический заряд).

- АТОМЫ КСЕНОНА
- ИОНЫ КСЕНОНА
- ЭЛЕКТРОНЫ
- МАГНИТНЫЕ СИЛОВЫЕ ЛИНИИ С “НАВИТЫМИ” ЭЛЕКТРОНАМИ
- МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
- ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ



нов происходит ее экранирование. Но в присутствии магнитного поля, которое влияет на движение электронов, объемные электрические поля в плазме могут существовать.

Проблема совместимости

Группа А.И. Морозова начала заниматься СПД в 1962 году. Почти пять лет двигатель существовал в лабораторном варианте – в 1967-м модель еще была оснащена водяным охлаждением. Пора было приступать к летно-космическим испытаниям, но на этом этапе разработчики столкнулись с неожиданной проблемой. Конструкторы космических аппаратов категорически отказывались ставить на борт что-либо электрическое! “Один из заместителей Королева, Михаил Васильевич Мельников, сказал мне, что электричество и ракетная техника несовместимы. Там ведь керосин, кислород – достаточно одной маленькой искорки, чтобы все взлетело на воздух”, – вспоминает Морозов. Директор ИАЭ академик Александров несколько раз встречался с конструкторами различных космических аппаратов, и ему удалось наконец договориться с Иосифьяном, главным конструктором спутников серии “Метеор”.

Однако проблемы на этом не закончились. В 1969 году Иосифьян выдал группе разработчиков техническое задание, согласно которому они должны были сделать не сам двигатель, а всю установку, включая систему питания, подачи ксенона и т.п. При этом надо было уложиться в очень жесткие рамки: тяга 2 гс, КПД 30–40%, потребляемая мощность 400 Вт, масса 15 кг, ресурс 100 часов. И все это нужно было сделать за 5 месяцев! Группа Морозова работала буквально днем и ночью, но успела. Изготовление же двигательной установки было поручено калининградскому ОКБ “Факел”, директором которого был в то время талантливый конструктор Роальд Снарский.

Триумф повелителя ветров

Через несколько дней после запуска “Метеора” начались эксперименты с двигателями. “Эол-1” был установлен на спутник таким образом, что ось его тяги не проходила через центр масс аппарата. При включении двигателя возник некоторый крутящий момент, который можно было компенсировать системой ориентации, при этом она служила еще и измерителем тяги “Эола”.

За экспериментом внимательно следили не только создатели двигателя, но и скептики, коих было достаточно. “Эол-1” должен был проработать всего несколько минут, потом автоматически выключиться (конструкторы боялись, что струя плазмы заблокирует радиосигнал с Земли на выключение). Двигатель отработал свое и выключился. После проведения радиоконтроля орбиты оказалось, что результаты в точности соответствуют лабораторным данным. Правда, скептики не уgomонились и выдвинули гипотезу, что изменение орбиты вызвано обычным истечением газа через открытый клапан. Но это предположение не подтвердилось: после второго включения по команде с Земли двигатель проработал еще 170 часов, подняв орбиту “Метеора-10” на 15 км. ОКБ “Факел” отлично справилось со своей задачей: ресурс был превышен почти вдвое.

Российское превосходство

В начале 1980-х “Факел” начинает серийно производить двигатели СПД-70 – потомки “Эолов”. Первый спутник с этим двигателем, “Гейзер №1”, был запущен в 1982-м, а в 1994-м новой моделью СПД-100 оснастили спутник связи “Галс-1”. Однако, хотя сообщение об успешном испытании плазменного двигателя “Эол” в 1974 году было совершенно открыто опубликовано в журнале “Космические исследования”, зарубежные конструкторы считали СПД лишь интересной теоретической разработкой. Поэтому демонстрация представителям NASA и JPL в 1991 году работающих двигателей “Факела” и сообщение, что подобными оснащены серийные спутники, вызвала у них настоящий шок (американцы в основном пошли по пути разработки ионных двигателей). Неудивительно, что “Факел” сейчас считается в мире ведущим производителем электроракетных плазменных двигателей. “На каждом третьем российском спутнике стоит наш двигатель, а три из пяти крупнейших западных производителей космических аппаратов покупают у нас СПД”, – рассказал “Популярной механике” директор и генеральный конструктор ОКБ “Факел” Вячеслав Михайлович Мурашко. – Ими, например, оснащены спутники MBSat-1, Intelsat-X-02, Inmarsat-4F1”. Посылая свой спутник SMART-1 к Луне, Европейское космическое агентство выбрало для него в качестве двигателей плазменные PPS-1350, совместную разработку французской компании Snesma Moteurs, ОКБ “Факел” и МИРЭА.

К другим планетам

Что же ожидает нас в ближайшем будущем? “В 1980-х годах наша группа в МИРЭА разработала двигатель следующего поколения, СПД Атон, – говорит “Популярной механике” Алексей Иванович Морозов. – Расходимость плазменного пучка в СПД-100 составляет +/- 45°, КПД – 50%, а соответствующие характеристики СПД Атон +/- 15° и 65%! Он пока не востребован, как и другой наш двигатель, двухступенчатый СПД Мах с измененной геометрией поля – конструкторы пока обходятся более простыми СПД-100”.

“Дальний космос требует двигателей с масштабами 10–100 кВт или даже МВт, – продолжает Морозов. – Подобные разработки у нас уже есть – в 1976 году в ИАЭ мы сделали двигатель мощностью в 30 кВт, да и “Факел” в конце 1980-х разработал СПД-290 мощностью 25 кВт для космического буксира “Геркулес”. В любом случае теория таких двигателей построена, поэтому в рамках классической схемы СПД вполне реально довести мощность до 300 кВт. А вот дальше, возможно, придется перейти к другим конструкциям. Например, к двухлинзовому ускорителю на водороде, разработанному в ИАЭ в конце 1970-х. Эта машина имела мощность 5 МВт и скорость истечения 1000 км/с. В любом случае я убежден, что на межпланетных кораблях будут стоять плазменные двигатели”.

“Популярная механика” в этом тоже уверена. Как и в том, что эти плазменные двигатели, скорее всего, будут сделаны в России.

ПМ

Дмитрий Мамонтов

Редакция выражает благодарность ОКБ “Факел” за помощь при написании статьи