

КОРРЕКТИРУЮЩИЕ ДВИГАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В.П. Ходненко, А.В. Хромов
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Проведен анализ требований к корректирующим двигательным установкам (КДУ) малых космических аппаратов и анализ возможных технических реализаций таких установок.

Рассмотрены три типа КДУ, наиболее полно отвечающие этим требованиям – установка на основе стационарного плазменного двигателя, КДУ с электротермокаталитическим гидразиновым двигателем и КДУ с аммиачным электронагреваемым двигателем. Проанализированы достоинства и недостатки каждой установки, особое внимание обращено на топливную экономичность (удельный импульс) и потребление электрической мощности (цена тяги) КДУ. Намечены пути создания двигательной установки малого космического аппарата с оптимальными энергетическими и массогабаритными параметрами.

Ключевые слова: космический аппарат, корректирующая двигательная установка, стационарный плазменный двигатель, термокаталитический двигатель, рабочее тело, гидразин, аммиак, электронагреваемые двигатели, тяга, суммарный импульс тяги, удельный импульс.

Современный этап освоения космического пространства характеризуется широкомасштабными разработками и применением малых космических аппаратов (МКА) массой 100 – 500 кг. Интерес к созданию и использованию МКА, наметившийся в последние годы как за рубежом, так и в России, объясняется их относительно низкой стоимостью, сокращением сроков разработки и изготовления, а также удешевлением вывода на орбиту и эксплуатации таких аппаратов.

НПП ВНИИЭМ разработана концепция использования перспективных малых аппаратов в орбитальных структурах КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), функционирующих на орбитах высотой 400 – 600 км. Формирование орбитальной структуры МКА и поддержание в течение достаточно длительных сроков (пять и более лет) её динамической устойчивости может быть обеспечено путем учета при выборе элементов орбит закономерностей естественной эволюции, а также путем проведения начальной коррекции и коррекции поддержания орбиты по фазе φ , высоте H , наклонению i с помощью бортовых корректирующих двигательных установок (КДУ). Как показывают расчеты, при сроке активного существования (САС) в пять и более лет, обойтись без КДУ не представляется возможным. Так для МКА массой 350 кг на орбите высотой 540 км с миделевым сечением в направлении полета не более $1,5 \text{ м}^2$ снижение высоты орбиты за три года составит 55 км, а уже через 5,5 лет МКА сгорит в плотных слоях атмосферы. Это накладывает высокие требования к надежности КДУ таких аппаратов.

Важной особенностью МКА является жесткое ограничение энергопотребления бортовой аппаратуры в целом и КДУ в частности. На аппаратах такого класса, как правило, не удается разместить

солнечные батареи (СБ) большой мощности, так как с ростом мощности батарей неизбежно растут их масса, размеры и момент инерции. Для МКА массой около 400 кг типичной является поверхность СБ в $5 - 7 \text{ м}^2$, а мощность, снимаемая с фотоэлектрической батареи в начале срока активного существования не превысит 1500 Вт. Деградация СБ за пять лет составляет в среднем 25%. Однако с уменьшением массы МКА размеры и мощность СБ резко уменьшаются, что связано с системной миниатюризацией КА. Для КА массой 100 кг площадь батареи будет $\sim 1,5 \text{ м}^2$, а её мощность в начале САС составит всего около 150 Вт. Кроме того, для всех МКА характерно отсутствие системы ориентации СБ, что снижает эффективность фотоэлектрических преобразователей. Поэтому в качестве двигательных установок на МКА должны применяться установки с небольшой ценой тяги – порядка 40 Вт/г, а суммарное потребление КДУ должно составить не более 200 – 250 Вт.

Ограничение массы и габаритных размеров также сильно влияет на конструктивный облик КДУ. Довольно остро стоит вопрос размещения баков для хранения рабочего тела. Для обеспечения минимального возмущающего момента при работе двигателя, его вектор тяги должен проходить через центр масс КА, причем с уменьшением его размеров и массы требование к точности соблюдения этого условия возрастает. Наличие же баков с рабочим телом и, как следствие, изменение положения центра масс МКА с течением времени с одной стороны накладывает ограничения на компоновку аппарата, а с другой – требует наличия на борту достаточно мощной системы ориентации корпуса, способной парировать возмущающие моменты КДУ.

В качестве двигательных установок для МКА могут рассматриваться КДУ на основе стационар-

ного плазменного двигателя (СПД), работающего на ксеноне, КДУ на основе электротермокаталитического гидразинового двигателя и КДУ на базе аммиачных электронагревных двигателей.

КДУ со стационарным плазменным двигателем

Начиная с 1972 г. двигательные установки данного типа используются для коррекции орбиты КА [1]. Высокий удельный импульс, достигающий 1500 – 1600 с (при напряжении разряда 300 В) обу-

славливает топливную экономичность таких двигательных установок. Так для выработки суммарного импульса тяги 40 кН·с при напряжении разряда порядка 180 В двигателю СПД-50 потребуется всего 5,2 кг рабочего тела, ксенона. Однако при этом высоким оказывается и потребление электрической мощности, необходимой для работы плазменного двигателя, что обуславливает высокую до 200 Вт/г цену тяги.

В основе принципа действия стационарного плазменного двигателя (рис. 1) лежит ускорение ионов рабочего тела электростатическим полем. Основными элементами СПД являются коаксиальная магнитная система с катушками намагничивания 3, между полюсами которой находится кольцевая диэлектрическая камера 2. Внутри кольцевого зазора камеры устанавливается анод-газораспределитель 1, а у среза двигателя расположен катод-компенсатор 4 с электродом поджига 5. Магнитное и электростатическое поля скрещены: магнитное направлено по азимуту H , а электростатическое E вдоль камеры от анода к катоду. В скрещенных электростатическом и магнитном полях горит разряд, в котором происходит ионизация рабочего тела (как правило, это инертный газ). В дальнейшем ионы рабочего тела ускоряются электростатическим полем, приобретая направленную энергию струи eU_p (U_p – напряжение между катодом и анодом). Объемный заряд ионов скомпенсирован электронами, движущимися в азимутальном направлении, на протяжении всего ускоряющего канала. При наличии Холловского тока достигается ускорение ионов в нейтральной плазме и устраняется ограничение по плотности ионного тока. Увеличение плотности тока влечет за собой увеличение возможной тяги двигателя, уменьшение массогабаритных характеристик и позволяет использовать относительно небольшие разрядные напряжения. На выходе из СПД положительный заряд плазмы компенсируется катодом, эмитирующим электроны.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) стационарного плазменного двигателя (рис. 2) имеет явно выраженную нелинейность. На ВАХ существует медленно растущий участок, в пределах которого существует неполная ионизация рабочего тела и область так называемого токового насыщения, которая соответствует практически полной ионизации рабочего тела. Ток насыщения прямо пропорционален расходу рабочего тела. Двигатель работает устойчиво только при полной ионизации рабочего тела. Для обеспечения работы СПД на вертикальном участке ВАХ требуется существенная

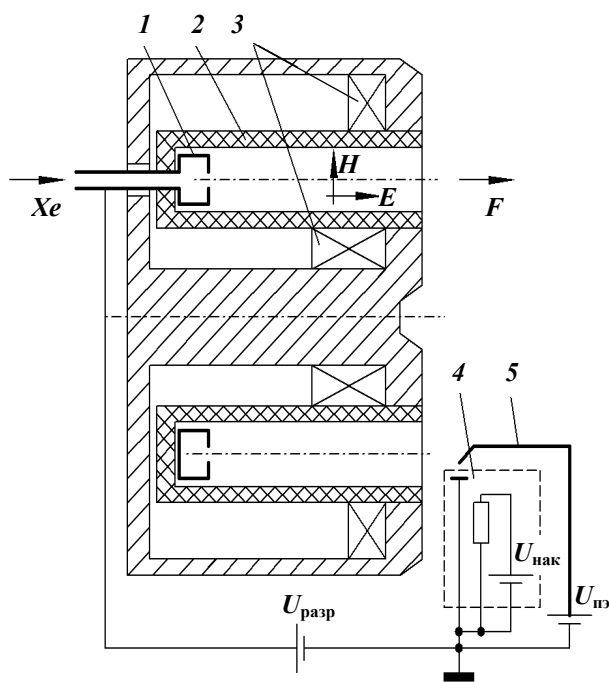


Рис. 1. Стационарный плазменный двигатель

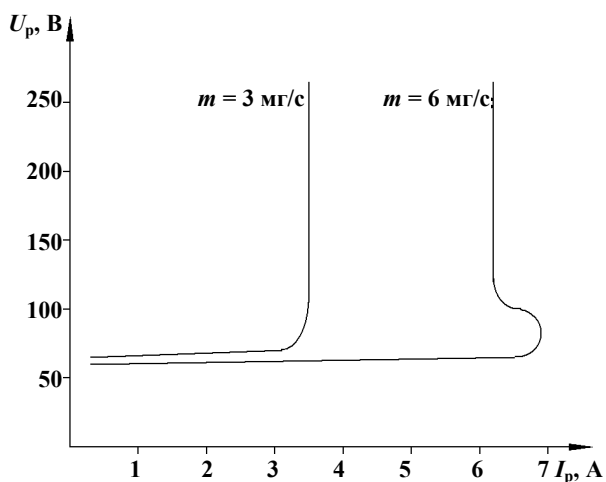


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика стационарного плазменного двигателя

электрическая мощность, этим отчасти объясняются трудности с отработкой двигателей СПД-25: из-за малой располагаемой мощности данный двигатель вынужден работать на горизонтальном участке вольт-амперной характеристики, что вызывает снижение удельного импульса, КПД, а главное приводит к нестабильной работе двигателя [2].

Использование в качестве рабочего тела инертного газа (ксенон), делает такую КДУ экологически чистой, а работу с ней безопасной. Кроме того, для такого рабочего тела используется простая и надежная система хранения и подачи.

Стационарные плазменные двигатели имеют богатую летную историю, причем приоритет в области СПД принадлежит России. Ведущим предприятием, серийно изготавливающим КДУ с такими двигателями, является ОКБ «Факел». В данный момент ОКБ располагает серийно изготавливаемыми двигателями СПД-50, СПД-70 и СПД-100, а также лабораторной моделью двигателя СПД-25 (таблица).

Характеристика	СПД-25, Лабораторная модель	СПД-50	СПД-70	СПД-100
		Летный образец		
Удельный импульс, с	810	1200	1500	1550
Масса двигателя, кг	--	0,7	2,0	3,5
Потребляемая мощность, Вт	100	300	700	1350
Тяга двигателя, мН (гс)	5 (0,5)	25 (2,5)	40 (4)	80 (8)

Ксеноновые КДУ в основном используются на больших КА, поскольку двигатели типа СПД требуют повышенного энергопотребления, а также несколько сложны в управлении и имеют повышенные массовые характеристики в сухом состоянии. Широкое применение в космической технике нашли ДУ на базе СПД-70 и СПД-100, энергопотребление которых составляет 700 и 1350 Вт соответственно. Что касается двигателей меньшего типоразмера, то они до настоящего времени практически не нашли применения, поскольку со снижением потребляемой мощности значительно ухудшаются характеристики ускорения. Имеется опыт эксплуатации СПД-50 с мощностью потребления 300 – 400 Вт на КА «Метеор-Природа» (запуск в марте 1977 г. и мае 1978 г.). Кроме того, КДУ на базе СПД-50 будет применена на КА «Канопус-В». Мощность потребления такой КДУ также составит 300 Вт, а тяга двигателя – 1,4 – 1,5 гс.

В состав КДУ с СПД входят двигательные блоки, система хранения и подачи, блок питания и управления. Система хранения представляет собой баки с рабочим телом, находящимся под большим давлением, система подачи включает в себя редуктор, снижающий давление до рабочего и термодроссель, управляющей расходом рабочего тела. Блок питания и управления – достаточно сложное устройство, обеспечивающее преобразование напряжения бортовой сети КА в напряжение разряда СПД, управление зажиганием разряда и запуском СПД, управление разрядными напряжением и током (в том числе, при режимах аномальной проводимости) и также управление расходом рабочего тела посредством термодросселя [3].

Одной из особенностей работы СПД является наличие режимов с аномальной проводимостью [4]. В таком режиме проводимость в разрядном канале (между анодом и катодом) резко возрастает, что влечет за собой увеличение разрядного тока. Причиной аномальной проводимости является загазованность разрядной камеры, накопление на стенках разрядной камеры продуктов разложения микроатмосферы вокруг двигателя с последующим отслоением частиц и попаданием их в плазменный промежуток, загрязнение двигателя при наземных испытаниях. В аномальном режиме происходит снижение тяги СПД и перегрузка преобразователя энергии, питающего двигатель. Единственным способом борьбы с аномальными режимами СПД является прожиг разрядной камеры ударным импульсом тока, который удаляет избыток рабочего вещества (или посторонние примеси) посредством теплового и электродинамического воздействия. На практике наличие таких режимов означает, что при работе СПД наблюдаются кратковременные (до 3 – 4 с) режимы повышенного потребления (порядка 1,4 – 1,5 номинальной мощности потребления). При использовании СПД на больших КА с мощной энергетикой такие режимы не оказывают существенного влияния на функционирование системы энергоснабжения КА, однако на МКА наличие режимов аномальной проводимости представляется рискованным.

Помимо прочего, весьма энергоемким является процедура пуска СПД. Для поджига разряда между анодом и катодом двигателя необходимо сначала вызвать термоэлектронную эмиссию катода-компенсатора путем его разогрева, зажечь при помощи поджигного электрода разряд на катоде и подать питание на анод. Потребляемая при этом мощность также превышает номинальную в полтора раза, а режим зажигания разряда между ано-

дом и катодом двигателя аналогичен режиму аномальной проводимости [4]. Следует отметить, что разработчики СПД постоянно совершенствуют их конструкцию. Так, например, на СПД-25 (ОКБ «Факел») применен безнагревный катод, который не требует предварительного нагрева перед пуском, за счет чего облегчаются условия работы преобразователя энергии, питающего СПД. Однако процедура пуска СПД остается весьма энергонапряженной.

Сложность изготовления и отработки СПД как исполнительного органа, так и подсистем хранения и подачи рабочего тела, с учетом стоимости ксенона, а также блоков электропитания и управления КДУ приведет к заметному увеличению стоимости разработки и изготовления КДУ на базе СПД.

Однако надо отметить, что на данном этапе развития космической техники КДУ на основе ксеноновых СПД прочно заняли нишу электроракетных двигательных установок (ЭРДУ), применяемых для коррекции орбиты тяжелых КА (в первую очередь геостационарных связных объектов) с большими сроками активного существования и развитой энергетикой в силу высокой степени отработанности и надежности, а также хороших массогабаритных показателей.

Применение СПД на МКА связано с определенным техническим риском и требует некоторого запаса мощности системы энергоснабжения (СЭС) спутника.

Наземная отработка СПД-25, модифицированного варианта СПД-50, основанного на применении унифицированных блоков и элементов двигателя, а также использования СЭС на основе перспективных солнечных (арсенид галлия) и аккумуляторных (литий-ионных) батарей, дают концепции использования КДУ на базе СПД право на жизнь и определенные преимущества.

КДУ с термokatалитическим двигателем

КДУ на основе термokatалитического двигателя (ТКД) по сравнению с СПД характеризуются очень низкой ценой тяги, составляющей 1 – 0,5 Вт/г. Это обуславливает заметное снижение энергопотребления таких КДУ. Главным же недостатком является сравнительно низкий удельный импульс, равный 210 – 220 с, что приводит к наличию заметных запасов топлива на борту КА и, как следствие, увеличению габаритов и массы.

Принцип действия ТКД основан на термическом разложении рабочего тела в присутствии катализатора. В качестве рабочего тела используется гидразин – наиболее высокоэнергетическое топливо среди известных однокомпонентных эндотермических видов

топлива. Например, по сравнению с перекисью водорода, он более стабилен при хранении и обеспечивает удельный импульс тяги до 240 с. В двигателе жидкофазное рабочее тело под воздействием катализатора разлагается на аммиак и азот. При этом часть аммиака, в свою очередь, разлагается на азот и водород. В результате реакции разложения гидразина выделяется тепло, подогревающее продукты разложения до $\sim 900^\circ\text{C}$. К сожалению, вместе с энергетическими достоинствами гидразин обладает и существенными недостатками. Во-первых, данное рабочее тело является токсичным и ядовитым, а также весьма нестабильным веществом, что вызывает необходимость особых условий при работе с гидразином на земле (при заправке и проверке КДУ). Во-вторых, гидразин имеет относительно высокую температуру замерзания $+1,7^\circ\text{C}$. Поэтому в гидразиновых КДУ должно быть обеспечено термостатирование блоков и трубопроводов установки.

В состав КДУ на базе ТКД входят блок хранения рабочего тела, двигательные блоки и трубопроводы для подачи рабочего тела. Как было указано выше, гидразин хранится на борту КА в жидкофазном состоянии. Внутренняя полость бака рабочего тела состоит из двух частей, изолированных друг от друга эластичной перегородкой, с одной стороны находится запас рабочего тела (гидразин), а с другой стороны – вытеснительный газ, как правило, азот. По мере выработки рабочего тела эластичная перегородка под давлением газа деформируется, вытесняя из бака рабочее тело. По мере выработки гидразина объем бака, занимаемый вытеснительным газом, увеличивается, а давление вытеснения падает, что сказывается на расходе рабочего тела, и, соответственно, на тяге двигателя. В качестве эластичной перегородки в настоящее время в России используются металлические сильфоны, а за рубежом – полимерные материалы. К сожалению, в России номенклатура баков, предназначенных для хранения гидразина, ограничена и ОКБ «Факел» (разработчик ТКД малой тяги) при изготовлении блоков хранения и подачи рабочего тела практически использует один бак производства НПО им. Лавочкина объемом 25 л гидразина. Блок хранения и подачи рабочего тела 14Д519, разработанный ОКБ «Факел», представлен на рис. 3 (на бак устанавливаются горловины, система терморегулирования, пироклапаны, датчики и т. д.). Указанный блок хранения и подачи плохо вписывается в концепцию МКА: он имеет габаритные размеры $920 \times 310 \times 330$ мм и сухую массу порядка 16 кг [6]. Однако следует учесть, что при полной заправке в 25 л гидразина, КДУ сможет обеспечить суммарный импульс тяги 53 кН·с, что позволяет обеспечить САС МКА не более 8 лет.

Кроме того, применение такого бака потребует установки двигательного блока соосно с блоком хранения и подачи рабочего тела, что увеличит длину конструкции до ~130 см – величины для малого спутника существенной.

Следующей технической задачей является получение в данной КДУ стабильной тяги. Так как давление гидразина на выходе из бака уменьшается, а тяга ТКД прямо пропорциональна давлению рабочего тела, то будет наблюдаться снижение тяги ТКД в процессе функционирования. Для стабилизации тяги двигателя необходимо использовать специальный блок стабилизации давления на выходе из блока хранения и подачи рабочего тела. Применение же КДУ без подобного блока затрудняется ещё и тем, что при полной заправке бака начальная тяга двигателя составит порядка 500 мН (50 гс). Такая величина тяги двигателя неизбежно вызовет возмущающий момент (из-за неточности установки двигательного блока на МКА), для парирования которого потребуется достаточно мощная система ориентации корпуса. Если учесть изменение положения центра масс при выработке рабочего тела, то суммарные величины возмущений могут оказываться неприемлемыми для МКА.

Не менее сложным устройством являются и двигательные блоки. Объединение ТКД в блоки вызвано необходимостью их термостатирования. Двигатели находятся в составе двигательных блоков, снабженных системой радиаторов, нагревателей и температурных датчиков. Это вызвано как необходимостью теплосброса с работающего двигателя, так и необходимостью его термостатирования, которое связано со специфическими свойствами рабочего тела и с особенностью процесса разложения его в двигателе. Рабочее тело подается в полость двигателя в жидкой фазе, при этом величина расхода определяется очень малым проходным сечением капиллярной трубки. Это определяет работоспособность двигателя, поскольку стабильный режим каталитического разложения гидразина может происходить только в условиях ламинарного режима истечения жидкого гидразина из капиллярной трубки. Малейшее нарушение этого режима, которое может произойти из-за засорения или появления газового пузыря, ведет к лавинообразному взрывному процессу. По этой причине в мировой практике используются гидразиновые двигатели с тягой 500 мН (50 гс) и более. И только предприятию ОКБ «Факел» удалось решить проблему создания двигателей с тягой 100 мН (10 гс). По этой причине в КДУ используются двигатели в составе двигательных блоков, снабженных авто-

номной системой терморегулирования, обеспечивающей температурный режим, необходимый для надежной работы двигателя.

КДУ с ТКД относятся к типу изделий, которые сложны в производстве. К производственно-технологическому обеспечению изготовителя предъявляются чрезвычайно высокие требования: особая чистота производственных участков, обусловленная наличием в тракте подачи рабочего тела капилляров с микронным проходным сечением и очень сложным в эксплуатации рабочим телом – гидразином.

В связи с этим стоимость изготовления и поставки КДУ по сравнению с КДУ других типов является высокой. Считается, что высокая стоимость КДУ на гидразине окупается высокой надежностью, достигаемой при их отработке в наземных и в натурных условиях. Большой спрос на гидразиновые КДУ подтверждает это мнение.

Гидразиновые КДУ имеют богатую летную историю и хорошо зарекомендовали себя на отечественных и зарубежных КА, в том числе на КА «Глонасс-М», «Экспресс-АМ» и SESAT. Применение их на МКА затруднено большим запасом рабочего тела, габаритами блока хранения и подачи рабочего тела. Однако возможность достичь низкого (до 30 Вт) потребления КДУ заставляет мириться с этими недостатками. Примером применения гидразиновой КДУ может служить МКА «ЭО-1» («Можаец»), который разрабатывался в НПП ВНИИЭМ.

КДУ с электронагревными двигателями

КДУ на основе СПД и ТКД, как было указано выше, имеет основные недостатки: СПД имеет высокую цену тяги – до 200 Вт/г, а ТКД – низкий удельный импульс (порядка 210 – 220 с) и, как следствие, большие запасы рабочего тела. Представляется разумной задача поиска

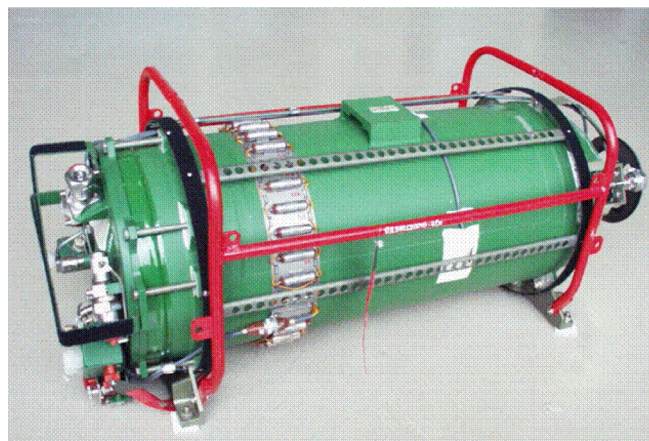


Рис. 3. Блок хранения и подачи топлива 14Д519 производства ОКБ «Факел»

компромисса между ценой тяги и удельным импульсом. Рациональной представляется КДУ с электронагревными двигателями (ЭНД), работающими на аммиаке. Такая КДУ позволяет получить тягу в 5 гс при потребляемой мощности порядка 200 Вт, что соответствует цене тяги 40 Вт/г. Удельный импульс тяги может составить 250 – 260 с, а запас рабочего тела, необходимый для выработки суммарного импульса тяги 40 кН·с, будет равен примерно 16 кг. При этом не требуется система вытеснения жидкого рабочего тела.

Принцип действия КДУ с ЭНД основан на термическом разложении аммиака на водород и азот при температуре порядка 1000° С. За счет разложения и, соответственно, двукратного уменьшения молекулярного веса истекающего газа по сравнению с газообразным аммиаком значительно повышается (до 260 с) удельный импульс двигателя. Процесс разложения аммиака является достаточно энергоемким и требует наличия на борту КА достаточно большой электрической мощности. КДУ на основе ЭНД были разработаны на предприятии ФГУП НИИЭМ (г. Истра) и успешно эксплуатировались на таких КА как «Метеор-Природа», «Ресурс-О1», «Электро» в качестве корректирующих двигательных установок, а на КА «Электро» и для разгрузки маховиков системы ориентации. Разработанный на предприятии электронагревный двигатель ЭНД-15 обеспечивал тягу 15 гс при потребляемой мощности 600 Вт. Особенностью данного двигателя является использование в качестве нагревательного элемента пористой карбидокремниевой трубки, которая обладает следующими достоинствами:

- чрезвычайно высокой теплопередающей способностью, определяемой порами микронных размеров;
- высоким электрическим сопротивлением в холодном состоянии, и как следствие – отсутствием стартовых токовых пиков.

Масса двигателя не превышает 250 г.

Система хранения и подачи рабочего тела аммиачных КДУ разработки НИИЭМ была весьма совершенна и хорошо отработана. Отличительные её особенности:

- отсутствие специальной системы вытеснения жидкого рабочего тела;
- отсутствие в гидротракте капилляров с микронными размерами, что гарантирует защиту от опасности засорения.

Разработанные для КА «Электро» шарообразные баки рабочего тела емкостью 16 л, выполненные из алюминиевого сплава по объему практически идеально подходят для использования на МКА, а размещение такого бака в центре масс КА минимизирует возмущающий момент. Представляется целесообразным возобновление работ по ЭНД во ФГУП НИИЭМ в связи с ориентацией предприятия НПП ВНИИЭМ на разработке малых космических аппаратов с большими сроками активного существования. Если систему хранения и подачи рабочего тела КА «Электро» можно практически в полном составе применять на МКА, то ЭНД должен быть переработан на основе следующих требований: снижение тяги двигателя до 5 гс, а энергопотребления КДУ до 200 Вт. Отработка ЭНД на указанных режимах позволит рационально использовать КДУ такого типа на МКА.

Литература

1. Разработка стационарного плазменного двигателя (СПД) и его испытания на ИСЗ «Метеор» / Л.А. Арцимович, И.М. Андронов, А.И. Морозов [и др.] // Космические исследования. – 1974. – Т. XII. – Вып. 3. – С. 451 – 468.
2. Small SPT unit development and tests / В. Arkhipov, V. Kim, V. Kozlov [etc.] // 28th International Electric Propulsion Conference Toulouse, France. 17 – 21 March 2003. – P. 139 – 145.
3. Глибицкий М.М. Системы питания и управления электрическими ракетными двигателями / М.М. Глибицкий. – М.: Машиностроение, 1981. – 136 с.
4. Катасонов Н.М. Способы электропитания и управления электроракетными стационарными плазменными двигателями / Н.М. Катасонов, В.Н. Галайко // Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 1997. – С. 139 – 145.

Поступила в редакцию 14.01.2009

Владимир Павлович Ходненко, д-р техн. наук, начальник лаборатории, т. 624-94-98.

Александр Викторович Хромов, аспирант, инженер, т. 607-25-35.

E-mail: vniiem@orc.ru.