

## **Корректирующая двигательная установка на базе стационарного плазменного двигателя 100 для перспективных космических аппаратов метеорологического назначения**

В.П. Ходненко, М.В. Колосова

### **Аннотация**

Приведены основные характеристики космических аппаратов, входящих в состав космического комплекса «Метеор МП», основные требования корректирующей двигательной установке для данных КА.

### **Ключевые слова:**

стационарный плазменный двигатель (СПД); корректирующая двигательная установка (КДУ); космический аппарат (КА).

### **Введение**

Одним из важнейших факторов целевого использования метеорологических спутников является соблюдение основных рабочих характеристик его орбиты, таких как период обращения, наклонение, эксцентриситет. В большинстве случаев данные условия крайне сложно выполнить без корректирующей двигательной установки (КДУ), которая должна осуществлять коррекцию орбиты спутника, а так же обеспечить сведение спутника с рабочей орбиты после окончания срока его активного существования (САС). Данная статья посвящена вопросам применения КДУ для перспективных космических аппаратов (КА) метеорологического назначения.

Одним из направлений деятельности ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» является создание и эксплуатация искусственных спутников дистанционного зондирования Земли, в том числе и спутников метеорологического назначения. Предприятие насчитывает более чем

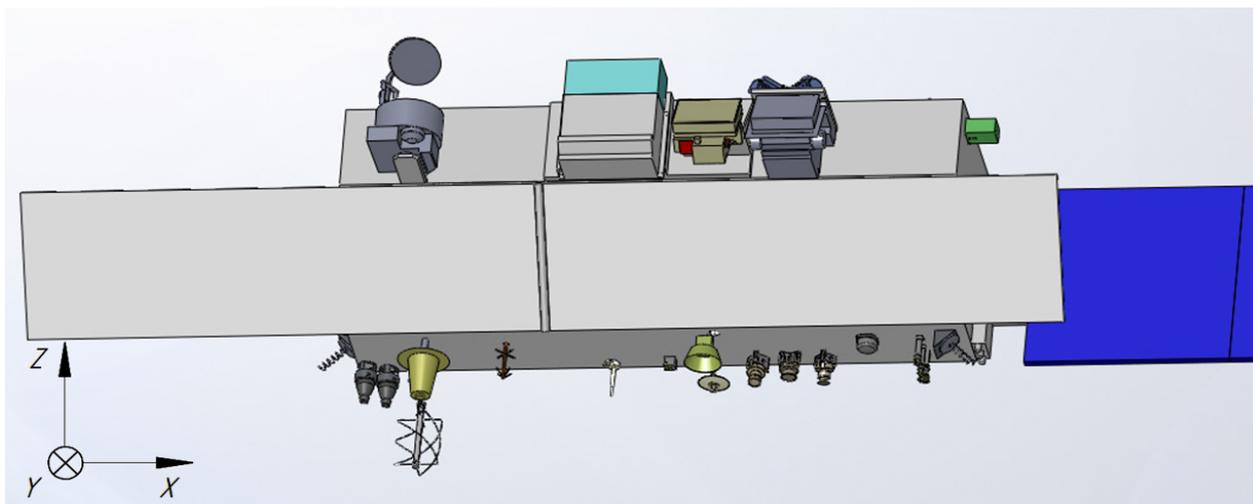
сорокалетнюю историю успешной разработки и запуска КА со стационарными плазменными двигателями (СПД), разрабатываемыми в ОКБ «Факел».

Начиная с 70 годов прошлого века, проводились запуски метеоспутников и КА природоресурсного назначения серии «Метеор» и «Метеор-Природа» с двигательными установками (ДУ) на базе СПД-50 и СПД-60. Это были также и первые летные испытания СПД. В ходе этих испытаний была успешно решена практическая задача – изменение высоты орбиты спутника на 16.9 км за 170 часов и перевод его на рабочую условно-синхронную орбиту при потребляемой мощности ДУ 420-460 Вт и тяге 16-19 мН, а также получено подтверждение совместимости ДУ с бортовыми системами спутника. Такие ДУ с СПД успешно эксплуатировались на КА типа «Метеор» еще более 10 лет, были отработаны многие принципиальные вопросы работоспособности СПД в космосе, такие как: стабильность тяги, надежность, интеграция с КА и многие другие [1]. Успешность этих отработок и испытаний определила дальнейшие перспективы использования ДУ с СПД на КА. В настоящее время готовится к запуску малый КА мониторинга природных катастроф «Канопус-В» с КДУ на базе СПД-50. Данный КА обладает массой 450 кг и должен функционировать на круговой солнечно-синхронной орбите в течение 7 лет.

Перед КА, предназначенными для наблюдения за поверхностью Земли, ставятся все новые и новые задачи. Со временем увеличиваются САС и полезная нагрузка, а, следовательно, и масса КА. Эти факторы не могут не сказаться на технических требованиях к их КДУ и, в частности, к электроракетным двигателям. Растут требования к тяге, суммарному импульсу и ресурсу.

### **Корректирующая двигательная установка КА «Метеор МП»**

В настоящее время ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» готовит проект создания гидрометеорологического космического комплекса четвертого поколения «Метеор МП», состоящий из трех КА «Метеор МП» № 1, 2 и 3 (рисунок 1). Эти КА имеют массу порядка 3000 кг, и должны функционировать в течение десяти лет на круговой солнечно-синхронной орбите [2]. Запуск КА будет осуществляется ракетой-носителем «Союз-2» с разгонным блоком «Фрегат». Для таких спутников уже не годятся СПД-50 или СПД-70, а требуются уже более мощные СПД-100, с большей тягой и способные выполнять работу по коррекции орбиты за меньшее время.



**Рис.1. КА «Метеор МП» в рабочем положении**

К КА «Метеор МП» предъявляются следующие требования (см. Таблицу 1).

**Таблица 1**

**Требования, предъявляемые к КА «Метеор МП»**

Основные характеристики	«Метеор МП» № 1 и № 2	«Метеор МП» № 3
Высота орбиты, км	830	650
Период обращения, мин	101	98
Наклонение орбиты, град.	98.68	97.98
Эксцентриситет	0.00124	0.00130
Масса КА, кг	3200	3000

После окончания САС КА «Метеор МП» требуется выполнение коррекции орбиты таким образом, чтобы в течение 25 лет последующего пассивного полета КА сгорели в плотных слоях атмосферы. Для этого высоту орбиты КА «Метеор МП» № 3 необходимо снизить до 450 км.

ДУ для данного КА разрабатывает ОКБ «Факел» по заказу ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». Принципиальная, конструктивная и электрическая схема данной КДУ должна быть реализована на основании прошлого опыта создания КА и максимально заимствована в части блоков, используемых в составе других КДУ, прошедших отработку или находящихся в штатной эксплуатации. Такая КДУ должна быть способна выдавать суммарный импульс тяги не менее 100 т×с (расчетные данные по энергетическим затратам на коррекцию орбиты и сведение с орбиты (см. таблицу 2)).

**Таблица 2**

**Расчетные данные по энергетическим затратам на коррекцию орбиты и увод с орбиты**

Корректируемые параметры орбиты	Импульс тяги, т×с	
	КА №1, 2	КА № 3
Начальная коррекция по наклонению	1.48	1.55
Начальная коррекция эксцентриситета	1.02	1.04

Начальная коррекция аргумента перигея	0.33	0.36
Начальная коррекция периода обращения	0.62	0.67
Поддержание солнечной синхронности орбиты	25.28	7.23
Перевод на орбиту утилизации и затопление	58.8	38.0
Суммарные затраты	87.53	48.85

В таблице 3 приведены параметры работы СПД-50, СПД-70, и СПД-100 при суммарном импульсе 100 т×с. СПД-50 не может обеспечить выработку заданного суммарного импульса тяги, так как расчетное время работы двигателя составляет более 10 тысяч часов, а по данным ОКБ «Факел» отработанный ресурс СПД-50 составляет 800 часов. Запас рабочего тела (РТ), необходимого для КДУ на основе СПД-70, мало отличается от запаса ксенона, необходимого для СПД-100, поэтому при сравнительно небольшой разнице в массовых характеристиках СПД-100 может выполнить работу по коррекции орбиты за гораздо более короткий срок, что и является важным критерием выбора двигателя.

**Таблица 3**

### Параметры СПД

Тип двигателя	СПД-50	СПД-70	СПД-100
Удельный импульс, с	1000	1500	1550
Запас рабочего тела, кг	100	66.7	64.5
Тяга двигателя, гс	1,5	4	8
Потребляемая мощность, Вт	300	700	1350
Время коррекции ошибок выведения, час	639	240	120
Суммарное время коррекций поддержания, час	4682	1756	878

Энергопотребление КДУ при номинальном напряжении питания системы электроснабжения при работе СПД-100 должно составлять не более 1400 Вт. Напряжение питания КДУ – постоянное 28 В ± 1 В. Продолжительность подготовки КДУ перед первым включением СПД-100 не более 6 суток. Пауза между включениями КДУ не более двух суток.

Масса КДУ в заправленном состоянии 114 кг. Масса РТ, заправляемая в баки КДУ, с учетом потерь на негерметичность КДУ составляет 65 кг при погрешности заправки ± 0.1 кг.

Коррекция орбиты будет осуществлена путем создания управляющих тяговых усилий в направлении осей ±ОХ КА и ±ОУ КА в процессе формирования рабочей орбиты КА «Метеор МП», а также для поддержания параметров орбиты в требуемых пределах в процессе эксплуатации КА. Тяговые усилия по четырём направлениям обеспечиваются за счёт разворота КА относительно оси ОZ КА на угол ±90° при проведении коррекций по их торможению КА.

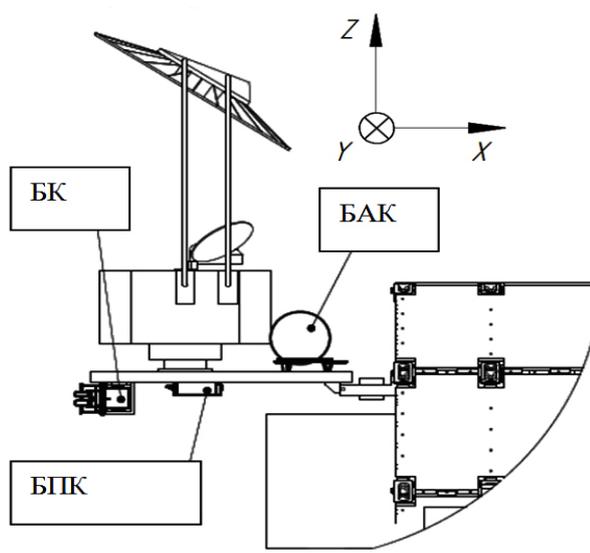
При начальной коррекции таких параметров орбиты как период обращения, эксцентриситет и аргумент перигея предполагается производить разворот КА на угол 180° относительно оси ОZ КА. Проведение коррекции по наклонению будет осуществляться за

счет разворота вокруг оси OZ на 90° при помощи системы ориентации. При коррекциях поддержания параметров орбиты указанные орбитальные маневры не потребуются.

Такая установка состоит из следующих функциональных блоков [3]:

- два блока коррекции (БК), каждый с одним двигателем СПД-100, двумя модулями газораспределения (МГР), двумя нагревателями блока, двумя датчиками температуры;
- блок подачи ксенона (БПК) для подачи ксенона в БК;
- блок хранения ксенона (БХК);
- межблочные трубопроводы (МБТ).

Блоки КДУ расположены на поворотном кронштейне, который приводится в рабочее положение после выведения КА на орбиту (рисунок 2). Привод кронштейна спроектирован с обеспечением заданной точности прохождения векторов тяги двигателей через центр масс КА. Такое расположение двигательных блоков позволяет производить коррекции периода обращения каждого КА и их фазового расположения (при подъеме высоты орбиты) с сохранением штатной ориентации. Блоки хранения РТ расположены вблизи двигательных блоков, что обеспечивает минимальные длины трубопроводов подачи рабочего тела.



**Рис.2. Схема расположения блоков КДУ**

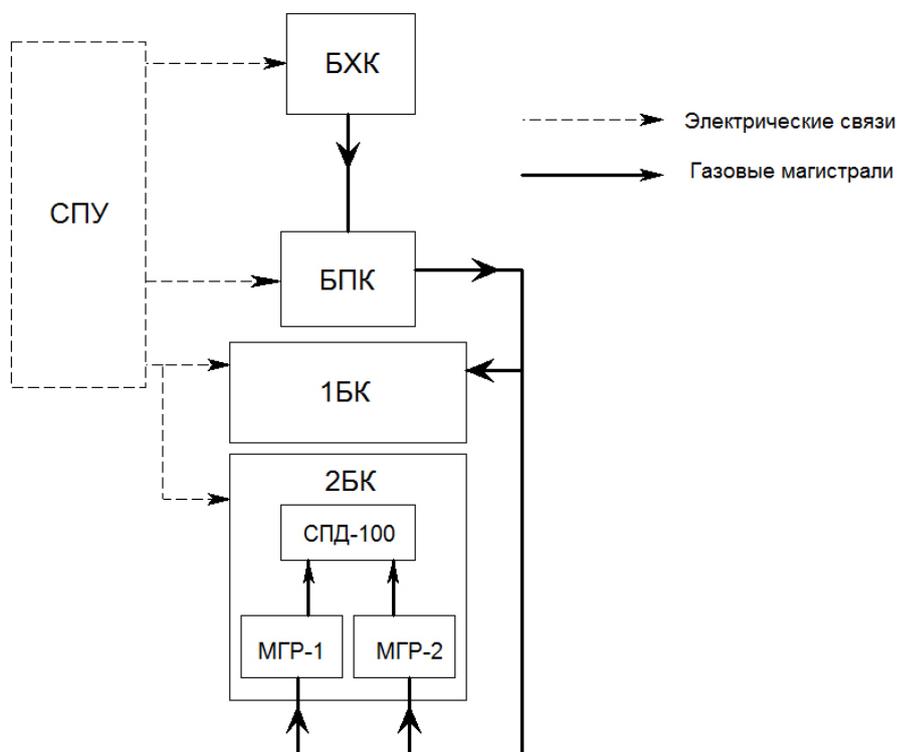
В состав данной КДУ должен входить СПД-100, соответствующий следующим параметрам:

- рабочий ресурс - 800 часов;
- номинальное значение тяги двигателя -  $8 \times 10^{-2}$  Н;
- удельный импульс - 1500 с;
- мощность - 1350 Вт;

- начальное отклонение тяги двигателя от номинального значения - не более 6 %;
- отклонение тяги двигателя от номинального значения - не более  $\pm 10$  %;
- отклонение вектора тяги от геометрической оси двигателя - не более 60 угловых минут;
- время подготовки двигателя к включению - не более 220 с;
- минимальная пауза между отключением и последующим включением - не менее 25 минут.

Двигатели СПД-100 устанавливаются с использованием промежуточного кронштейна на панели КА с учетом прохождения осей этих двигателей через центр масс КА.

Функциональная схема КДУ приведена на рисунке 3.



**Рис.3. Функциональная схема КДУ**

БХК предназначен для хранения ксенона. Этот блок содержит сферический бак из титанового сплава и два пироклапана, после подрыва которых осуществляется поступление рабочего тела в СПД.

БПК предназначен для редуцирования высокого давления ксенона и подачи его от БХК к МГР в требуемом диапазоне давлений. БПК обеспечивает на выходе расход ксенона не более 35 мг/с.

Организация рабочего процесса должна происходить следующим образом: режимы работы КДУ, в том числе подготовка ее к работе, подрыв пироклапанов, подготовка к включению и включение двигателей каждого из блоков коррекции реализуются системой

преобразования и управления (СПУ) в соответствии с командами, поступающими от системы управления КА. После подготовки КДУ к работе и подрыва пироклапанов БХК, РТ поступает на вход блока БПК. БПК содержит две независимые ветви подачи РТ, при этом в процессе работы КДУ задействована одна из ветвей, вторая находится в резерве.

Описание функционирования СПД-100 приведено на примере работы одного двигателя. СПД состоит из анодного блока и двух катодов. В анодный блок входят разрядная камера с анодом и магнитная система. Разрядная камера состоит из изолятора, выполненного из керамики в виде двух коаксиальных цилиндров, соединенных с одной стороны стенкой, и коробчатого анода из стали, закрепленного на этой стенке. Анод, выполняя функцию одного из электродов СПД-100, служит в то же время для подвода и распределения РТ в канале разрядной камеры. РТ из МГР подается в анод и катоды через газоподводы. Анод электрически развязан от корпуса посредством керамического изолятора, установленного в газопроводе. Изолятор камеры через обойму, являющуюся тепловой развязкой, закреплен на наружном полюсе магнитной системы. Магнитная система состоит из магнитопровода, наружного и внутреннего полюсов, магнитных экранов и катушек намагничивания (одной внутренней и четырех наружных). Элементы магнитной системы выполнены из электротехнической стали. Катушки намагничивания намотаны жаростойким проводом. Магнитопровод анодного блока является силовым каркасом модуля. Катод выполнен как полый катод с эмиттером из гексаборида лантана. Эмиттер размещен в капсуле из молибденового сплава. Капсула с эмиттером установлена внутри спирального нагревателя. Для уменьшения тепловых потерь нагреватель окружен тепловыми экранами. Трубка катода служит для подвода ксенона к катоду. От корпуса эмиттер изолирован. Пусковой электрод выполнен в виде цилиндра, закрепленного на изоляторе.

Принцип создания тяги СПД-100 основан на взаимодействии заряженных частиц плазмы с взаимноперпендикулярными продольным электрическим и радиальным магнитным полями, создаваемыми в коаксиальном канале разрядной камеры.

Запуск СПД-100 происходит при подаче ксенона в катод и анод, а также напряжения на пусковой электрод, катод и анод после предварительного разогрева катода. Возникающий разряд в цепи катод - пусковой электрод инициирует основной разряд в цепи анод - катод. Поступающее через анод рабочее тело (ксенон), ионизируется в канале разрядной камеры движущимися навстречу электронами. Ионы ускоряются в продольном электрическом поле для создания тяги двигателя.

Во время подготовки и работы двигателя задействован один из катодов, второй находится в резерве. Выбор катода, его подготовка к работе и, при необходимости, переход с

одного катода на другой, осуществляется в соответствии с алгоритмом функционирования КДУ.

Подача РТ в анодный и катодный тракты двигателя осуществляется через один из соответствующих выбранному катоду блок МГР. МГР выполняет следующие функции:

- обеспечивает подачу РТ в двигатель и осуществляет его распределение между анодным и катодным трактами;
- исключает возможность несанкционированного расхода РТ в тракт резервного катода, что улучшает его ресурсные характеристики;
- поддерживает заданное значение разрядного тока регулированием расхода РТ за счет его прохождения через регулятор расхода.

Каждый блок МГР предназначен для работы с одним катодом двигателя СПД-100.

В режиме подготовки двигателя к включению, СПУ осуществляет подачу питания в цепь нагревателя одного из катодов, выбранного в соответствии с алгоритмом функционирования КДУ, а также обеспечивает дежурный режим соответствующего регулятора расхода, осуществляя его нагрев током заданного значения. Дежурный режим работы регулятора расхода (соответствует включенному состоянию накала соответствующего катода) обеспечивает оптимальный расход РТ в анодный тракт двигателя при его запуске.

В процессе функционирования КДУ РТ с выхода БПК поступает в выбранный МГР и распределяется между катодным и анодным трактами выбранного двигателя. Управление работой регулятора расхода по поддержанию тока разряда на заданном уровне осуществляется СПУ за счет изменения мощности нагрева регулятора расхода, в зависимости от значения тока в цепи разряда двигателя. Режимы работы двигателей реализуются СПУ и обеспечиваются коммутацией цепей питания соответствующих элементов БПК и собственно двигателя, являющихся нагрузками СПУ.

В заключении следует отметить, что такая ДУ, обладая хорошими выходными параметрами, может быть использована не только на КА серии «Метеор», но и на других перспективных КА метеорологического назначения, обладающих аналогичными массовыми и орбитальными характеристиками.

## **Библиографический список**

1. Электрореактивные системы ОКБ «Факел» Сборник докладов и статей. Калининград 2010.

2. Гидрометеорологический и океанографический космический комплекс (КК) мониторинга Земли четвертого поколения «Метеор-МП». Эскизный проект. Пояснительная записка. Часть 1.Общее построение КК. ОМ40.00.00.000 ПЗ 1.
3. КДУ Эскизный проект КА «Метеор-МП» Материалы в пояснительную записку 262.485.000.00ПЗ.

### **Сведения об авторах**

ХОДНЕНКО Владимир Павлович, главный научный сотрудник ОАО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени Г.А. Иосифьяна» (ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)), д.т.н.

Россия, 107078, г. Москва, Хоромный тупик, д. 4, стр. 1;

тел.: +74956249498.

КОЛОСОВА Марина Владимировна, инженер ОАО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени Г.А. Иосифьяна» (ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)).

Россия, 107078, г. Москва, Хоромный тупик, д. 4, стр. 1;

тел.: +74956072535; e-mail: [marina.kolosova@gmail.com](mailto:marina.kolosova@gmail.com)