

## ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЕКТНОГО ОБЛИКА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ОСНАЩЕННОГО ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ

Множества допустимых фазовых координат, управлений и проектных параметров для задачи выбора оптимальных проектных схем космического аппарата (КА) с корректирующей электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) указаны ниже.

Состав множества альтернатив:

- использование в качестве корректирующей двигательной установки (КДУ) жидкостных реактивных двигателей (ЖРД);
- использование в качестве КДУ ЖРД совместно с ЭРДУ;
- использование в качестве КДУ ЭРДУ.

Множество баллистических параметров:

- параметры рабочей орбиты ИСЗ,  $\{A, e, i, \omega, \Omega\}$ ;
- баллистический коэффициент КА,  $\sigma_{КА}$ .

Множество проектных параметров:

- характеристики электроракетных двигателей (ЭРД),  $F_T$  – сила тяги,  $N_{ЭРД}$  – потребляемая мощность и др.;
- количество ЭРД в ЭРДУ  $[n, \text{целочисленное}]$ .

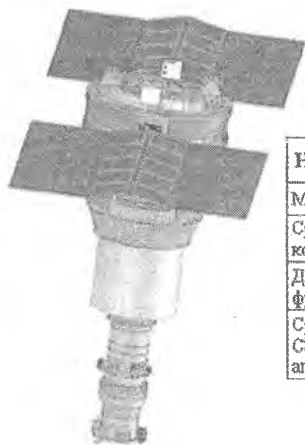
Критерии предпочтения:

- $T_{свиц} \rightarrow \max$  (срок активного существования КА);
- $M_{\text{тон.эрд}} \rightarrow \min$  (масса рабочего тела, необходимого для коррекции за  $T_{свиц}$ );

Ограничения:

- $N_{\text{эрд}} \leq N_{\text{огт}}$  (потребляемая ЭРДУ мощность не превышает допустимой величины);
- $M_{\text{эрд}} \leq M_{\text{огт}}$  (масса ЭРДУ не более допустимой величины).

Оценка потребного для коррекции рабочего тела ЭРДУ проведена для КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) класса "Ресурс", характеристики которого указаны на рисунке 1.



Наименование параметра	Значение
Масса КА	≈6400 кг
Средний баллистический коэффициент	≈0,0035 м <sup>2</sup> /кг
Диапазон высот функционирования	300 + 600 км
Среднесуточная мощность СЭП, выделяемая для целевой аппаратуры	≈400 Вт

Рис. 1. КА ДЗЗ класса "Ресурс"

Исследования проведены для четырех марок ЭРД производства ОКБ "ФАКЕЛ", прошедших летные испытания: это СПД-50, СПД-60, СПД-70, СПД-100 (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики СПД производства ФГУП "ФАКЕЛ"

Двигатель	СПД-50	СПД-60	СПД-70	СПД-100
Тяга, мН	20	30	40	83
Удельный импульс, м/с	12500	12500	12500	16000
Мощность, кВт	0,35	0,517	0,593	1,221
Ресурс, ч	2250	2500	3100	7500
Масса, кг	0,8	1,2	1,5	3,5
Рабочее тело	Ксенон	Ксенон	Ксенон	Ксенон

Рассмотрен вариант функционирования КА на околокруговых орбитах, лежащих в диапазоне высот 350÷400 километров. Диапазон коррекции высот ( $\Delta H$ ) подбирался таким образом, чтобы выполнялись условия:

$$M_{\text{топ эрду}} \rightarrow \min; \sum M_{\text{эрду}} \leq M_{\text{дон}}; T_{\text{сум}} \rightarrow \max.$$

Относительное время работы ЭРДУ на витке подбиралось таким образом, чтобы выполнялись условия:  $\sum N_{\text{эрду}} \leq N_{\text{дон}}, P \rightarrow \max.$

При анализе результатов моделирования можно отметить то, что лучшим всего для коррекции орбиты КА класса "Ресурс" подходит двигатель СПД-100, так как он имеет наибольшую тягу. Однако он не удовлетворяет ограничениям по энергетике, накладываемым энергетической установкой с учетом программы функционирования аппаратуры наблюдения (АН).

Подходящей для использования, является установка на базе двигателей СПД-70.

Оценку увеличения срока существования КА ДЗЗ класса "Ресурс" проведем при следующих условиях:

- ЭРДУ содержит два одновременно работающих СПД-70;
- большая полуось и эксцентриситет корректируются на оптимальных участках;
- учитываются ограничения, накладываемые энергетической установкой и программой работы аппаратуры наблюдения;
- КА рассчитан на три года активного существования. Для определения потребного запаса ксепона без учета использования ЖРДУ моделирование проводится на интервале времени в один год для различных уровней солнечной активности;
- эксцентриситет орбит  $e \in \{0; 0.01; 0.183\}$ ;
- высота перигея орбиты  $h_x \in \{350; 400\}$  км.

Результаты расчетов приведены на рисунке 2.



Рис. 2. Зависимости расхода рабочего тела (РТ) в год для различных уровней солнечной активности

Эти результаты можно использовать в качестве исходных данных для проектирования системы коррекции орбиты на базе ЭРД (таблица 2).

Таблица 2 – Расход рабочего тела за год полета при крайних состояниях атмосферы Земли

Высота перигея, км	Эксцентриситет $e = 0$		Эксцентриситет $e = 0,01$		Эксцентриситет $e = 0,0183$	
	Расход (мах), кг	Расход (мин), кг	Расход (мах), кг	Расход (мин), кг	Расход (мах), кг	Расход (мин), кг
350	44,659	5,326	22,839	2,779	15,944	2,162
360	39,353	4,337	20,478	2,329	14,901	1,805
370	34,13	3,56	18,224	1,97	14,238	1,547
380	30,489	2,967	16,28	1,665	13,83	1,301
400	23,018	2,026	13,809	1,156	13,154	0,962

Как видно, наибольший потребный запас РТ потребуется для поддержания круговой орбиты с высотой перигея 350 км. Для эллиптических орбит потребный запас со-

ставляет 22,8 кг ксенона. В расчете на наихудший вариант примем запас РГ равным 23 кг в год. Следовательно, на три года полета потребуется 69 кг ксенона.

Примерный срок активного существования КА, с точки зрения запаса рабочего тела для ЭРДУ, составляет три года. Если ЭРДУ проектировать как вспомогательную систему, дополняющую основную КДУ, то при совместном использовании ЖРД и ЭРДУ срок активного существования может увеличиться примерно в 1,5 раза.

При установке ЭРДУ на КА должны выполняться ограничения по массе и габаритам. Основную долю в габаритные размеры ЭРДУ будет вносить блок хранения ксенона (баки). Эти размеры будут определяться необходимым объемом для РГ и формой бака.

Потребное количество двигателей определяется направлениями векторов ускорения для коррекции различных элементов орбиты и требуемыми характеристиками надежности КА.

Элементы орбиты корректируются следующим образом (рис. 3):

- большая полуось орбиты – положительные "импульсы" по оси  $T$ ,
- эксцентриситет – положительные и отрицательные "импульсы" по оси  $T$ ,
- аргумент перигея – положительные и отрицательные "импульсы" по оси  $T$ ,
- долгота восходящего узла – положительные и отрицательные "импульсы" по  $W$ ,
- наклонение – положительные и отрицательные "импульсы" по оси  $W$ .

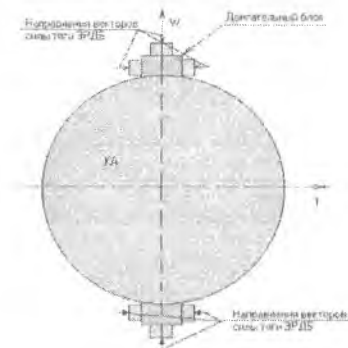


Рис. 3. Схема размещения двигательных блоков

Чтобы не нарушать режим работы АП и обеспечить доступную максимальную энергию с солнечных батарей, КА должен оставаться в ориентированном положении. Для этого разместим двигатели так, чтобы направления векторов тяги двигателей совпали с направлениями осей. Кроме того, необходимо, чтобы линия действия силы тяги проходила через центр масс КА, чтобы не создавать моментов. Также, учитывая

резервные характеристики, каждый маршевый двигательный блок должен содержать резервные ЭРД.

С учетом имеющихся ограничений и результатов расчетов, предлагается следующий вариант проектного облика КА класса "Ресурс" с дополнительной ЭРДУ на базе стационарных плазменных двигателей в качестве КДУ (рис. 4).

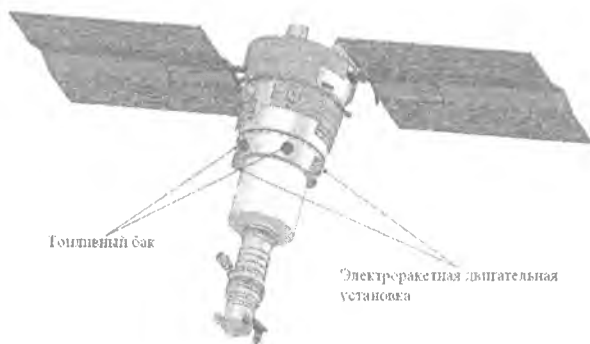


Рис. 4. Облик КА класса "Ресурс" с ЭРДУ

Для такой функциональной схемы ЭРДУ ее суммарная масса вычисляется по формуле:

$$\Sigma M_{ЭРДУ} = M_{МДБ} + M_{БХРГ} + M_{БК} \quad (1)$$

Здесь  $M_{МДБ}$  — масса маршевого двигательного блока, включающего в себя двигателя СЦД-70 и блоки газораспределения типа БР-70;  $M_{БК}$  — масса блока подачи ксенона (БК), включающего основную и резервную магистрали подачи, каждая из которых содержит регулятор давления (редуктор), клапаны, термодатчик, датчики высокого и низкого давления;  $M_{БХРГ}$  — масса блока хранения ксенона (БХРГ);

$$M_{МДБ} = n_1 \cdot M_{СЦД\ 70} + n_2 \cdot M_{БР} + \Delta M_{кр} \quad (2)$$

где  $\Delta M_{кр}$  — масса крепежных деталей;

$$M_{БХРГ} = M_{РТ} + n_{бак} \cdot M_{бак} + \delta M_n + \delta M_m + \delta M_k + M_{ред}$$

где  $M_{РТ}$  — масса ксенона,  $M_{бак}$  — масса конструкции одного топливного бака,  $\delta M_n$  — масса пироклапанов,  $\delta M_m$  — масса термодатчиков,  $\delta M_k$  — масса элементов крепления,  $M_{ред}$  — масса редуктора высокого давления.

Для КА класса "Ресурс" общей массой 6400 кг для коррекции околоорбитальной орбиты высотой порядка 350 км с учетом запаса рабочего тела на три года и дополнительным резервированием систем масса ЭРДУ составит 158 кг.

Для КА класса "Ресурс" максимальный запас химического топлива для маневров и коррекции составляет около 900 кг. При оснащении ЭРДУ массой 150 кг запас топлива для ЖРД можно сократить на такую же массу и более. При этом общая масса модернизированного КА не увеличивается.