

РЕШЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Для ряда транспортных операций в космосе критерием оптимальности выступает масса полезного груза при заданной массе космического аппарата (КА). Маневр осуществляется с заданной опорной орбиты на заданную конечную за фиксированное время. Параметрическая задача оптимизации заключается в выборе параметров двигательной системы из условия максимума критерия. При этом динамическая задача часто сводится к вычислению величины характеристической скорости маневра, зависящей только от параметров орбит.

Маневры, требующие существенных затрат характеристической скорости, могут быть выполнены многоступенчатыми КА. Оптимальные условия сочетания различных двигательных систем и области преимущественного использования двигателей выведены в [1]. Полученные соотношения не удобны для проведения инженерных расчетов при формировании проектного облика КА.

В данной работе будут выведены условия оптимального подбора размеров ступеней для КА, состоящего из двух последовательно расположенных разгонных блоков с двигательными системами на основе жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) и на основе электрореактивного двигателя (ЭРД), выполняющего маневр набора заданного модуля скорости в бессиловом поле.

Масса двухступенчатого КА M_0 в основном определяется массой полезного груза $M_{пг}$, массами двигателей, баков, рабочего тела и массами энергоустановки ступеней $M_i^A, M_i^B, M_i^{PT}, M_{ЭРД}$:

$$M_0 = M_{пг} + \sum_{i=1}^2 (M_i^A + M_i^B + M_i^{PT}) + M_{ЭРД}. \quad (1)$$

Масса второй ступени является полезной нагрузкой первой ступени. Дополнительного подвода энергии требует только РБ с ЭРД, поэтому масса энергоустановки вынесена из-под знака суммы.

Используя принятые в [1] соотношения для составляющих массы КА, считая скорость истечения рабочего тела ЖРД постоянной на весь маневр, массовое уравнение может быть преобразовано к безразмерному виду:

$$\mu \cdot \left\{ 1 - \gamma_{ЖРД}^1 - (1 - e^{-\frac{V_{ЖРД}}{C_{ЖРД}}}) \cdot (1 + \gamma_{ЖРД}^b) \right\} \cdot \left\{ 1 - (1 - e^{-\frac{V_{ЭРД}}{C_{ЭРД}}}) \cdot (1 + \gamma_{ЭРД}^b + \frac{C_{ЭРД}}{\Gamma} \cdot [V_{ЭРД}^1 + C_{ЭРД} \cdot \gamma_{ЭРД}^b]) \right\}.$$

где μ - масса полезного груза, отнесенная к массе КА на опорной орбите, $\gamma_{ЖРД}^1$ - удельная масса ЖРД, $V_{ЖРД}$ - затраты характеристической скорости на маневр РБ с ЖРД, $C_{ЖРД}$ - удельный импульс ЖРД, $\gamma_{ЖРД}^b$ - удельная масса баков РБ с ЖРД, $V_{ЭРД}$ - затраты характеристической скорости на маневр РБ с ЭРД, $C_{ЭРД}$ - скорость истечения рабочего тела ЭРД, $\gamma_{ЭРД}^b$ - удельная масса системы подачи и хранения топлива, $\gamma_{ЭРД}^1$ - удельная масса ЭРД, $\gamma_{ЭРД}$ - удельная масса энергоустановки, Γ - моторное время работы двигателей ЭРД.

Зададимся значениями удельных характеристик, скорости истечения рабочего тела ЖРД, временем перелета и требуемым приращением скорости V . Причем:

$$V = V_{ЖРД} + V_{ЭРД}. \quad (3)$$

Таким образом, параметрическая задача оптимизации многоступенчатого КА может быть сформулирована следующим образом: для заданного значения V , определить величины $V_{ЖРД}$ и $V_{ЭРД}$, с учетом условия (3), из условия максимума μ .

Функция относительной массы полезного груза КА является произведением нелинейных функций двух переменных:

$$\mu = f_1(V_{ЖРД}) \cdot f_2(V_{ЭРД} - C_{ЭРД}). \quad (4)$$

и задачи поиска максимума данной функции может быть решена только численно.

Из уравнения (4) можно получить условие оптимального подбора ступеней в виде:

$$k \cdot C_{ЖРД} \left\{ 1 - \frac{\gamma_{ЖРД}^1 + \gamma_{ЖРД}^b}{1 + \gamma_{ЖРД}^b} e^{-\frac{V_{ЖРД}}{C_{ЖРД}}} \right\} \cdot C_{ЭРД} \left\{ 1 + \gamma_{ЭРД}^b + \frac{C_{ЭРД}}{\Gamma} \cdot [V_{ЭРД}^1 + C_{ЭРД} \cdot \gamma_{ЭРД}^b] e^{-\frac{V_{ЭРД}}{C_{ЭРД}}} \right\} = 0, \quad (5)$$

где k - характеристика качества ступени [1]. Достоинством данной характеристики является отсутствие зависимости от граничных условий исходной задачи.

Для ступени с ЖРД указанная характеристика зависит только от величины характеристической скорости. Для ступени с ЭРД для каждого значения моторного времени Γ и скорости

чины характеристической скорости необходимо определять оптимальное значение скорости истечения рабочего тела из условия максимума характеристики. Построим графики характеристик качества ступеней в зависимости от характеристической скорости маневра для следующих значений конструктивных параметров: $\gamma_{ЖРД}^d = 0,021 \text{ кг/кг}$, $\gamma_{ЖРД}^b = 0,077 \text{ кг/кг}$, $C_{ЖРД} = 3,255 \text{ км/с}$, $\gamma_{ЭРД}^d = 75 \text{ кг/Н}$, $\gamma_{ЭРД}^b = 0,5 \text{ кг/кг}$, $\gamma_{ЭУ} = 50 \text{ кг/кВт}$ (рис. 1).

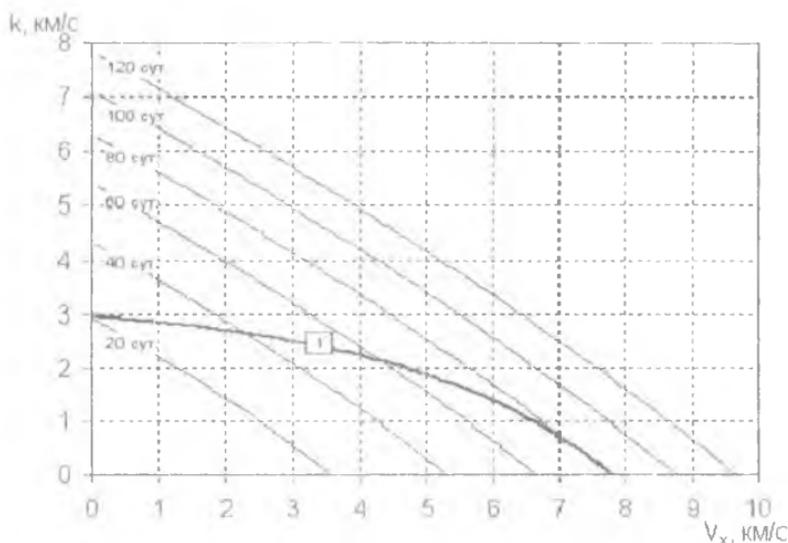


Рис. 1 Характеристики качества ступеней:
1 - РБ с ЖРД, тонкие линии - характеристики качества РБ с ЭРД для моторного времени 20, 40, 60, 80, 100, 120 суток

Проиллюстрируем алгоритм оптимального подбора ступеней с помощью условий (5) на примере приведенных зависимостей

Пусть имеются два РБ: один с ЖРД, другой с ЭРД, зададимся моторным временем РБ с ЭРД - 80 суток. Тогда в диапазоне $0 \leq V_v \leq 4,5 \text{ км/с}$ характеристика качества ступени с ЭРД превышает характеристику качества ступени с ЖРД, поэтому для выполнения маневра с указанными затратами характеристической скорости будет оптимален одноступенчатый аппарат с ЭРД. Для выполнения маневров с $4,5 \leq V_v \leq 15,6 \text{ км/с}$ оптимален двухступенчатый аппарат. Верхняя граница затрат характеристической скорости такого аппарата определяется как сумма максимальных затрат характеристической скорости каждого РБ.

Построим зависимости относительной массы полезного груза в зависимости от α характеристической скорости маневра (рис. 2).

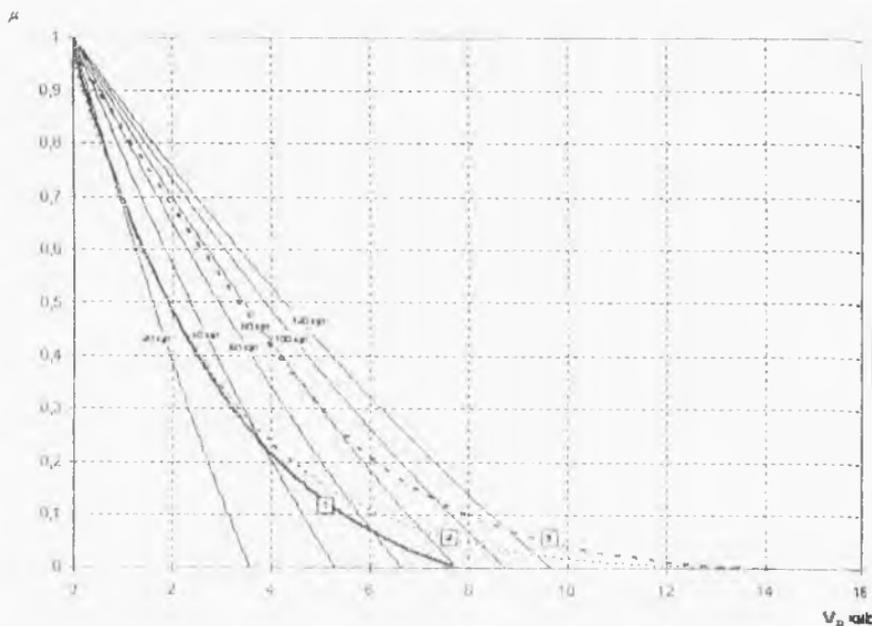


Рис. 2. Относительная масса полезного груза.

1 - одноступенчатый КА с ЖРД, 2 - двухступенчатый КА с ЖРД, 3 - 2-х ступенчатый КА с ЖРД и ОРД, тонкие сплошные линии - одноступенчатый КА с ОРД для моторного времени 20, 40, 60, 80, 100, 120 секунд.

Комбинированный двухступенчатый КА с двигателями ЖРД и ОРД по сравнению одноступенчатым КА с ОРД позволяет вывести больше полезного груза, когда характеристики качества ступеней с ЖРД и ОРД становятся равны, что подтверждает предложенный выше алгоритм.

Характеристики качества ступеней могут быть построены для различных сочетаний проектных параметров. Выбор количества и состава ступеней может быть проведен без решения исходной задачи поиска максимума функции двух переменных, и может являться начальным приближением при формировании облика многоступенчатого КА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Гродзовский Г.Л. Механика космического полета (проблемы оптимизации). // Наука М., 1975.