

Ишков С.А., Сюй Сяое, Фадеенков П.В., Храмов А.А.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДВИЖЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ НА РАЗБРОС ТОЧЕК ПОСАДКИ СПУСКАЕМОЙ КАПСУЛЫ

Впервые орбитальная тросовая система (ОТС) была описаны в книге К.Э. Циолковского «Грёзы о небе» в 1895 году. Интерес учёных к ОТС велик. С помощью ОТС можно решить ряд задач в космосе, одна из которых доставка полезного груза – спускаемой капсулы (СК) – на Землю без применения реактивной тяги.

В настоящей статье рассматривается задача определения разброса точек посадки спускаемой капсулы на поверхность Земли при развёртывании ОТС.

Развёртывание ОТС проводится в три этапа. На первом этапе происходит отстрел СК от базового космического аппарата (БКА) и выпуск троса на определённую длину. На втором этапе происходит развёртывание троса на полную длину, а СК отклоняется от линии местной вертикали на максимальный угол. На третьем этапе происходит маятниковое движение СК на тросе в сторону линии местной вертикали и, в момент её прохождения, трос отрезается, СК получает аналог тормозного импульса и переходит на эллиптическую орбиту, проходящую через плотные слои атмосферы. СК совершает пассивное движение по этой орбите и приземляется в некотором районе поверхности Земли.

Рассматривается следующая математическая модель развёртывания ОТС [1]:

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta} &= V_{\theta}, \\
 \dot{V}_{\theta} &= -\frac{2 \cdot (V_{\theta} + \omega) \cdot V_r}{r} - \frac{3 \cdot \omega^2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{1 + e \cdot \cos \vartheta} - \dot{\omega}, \\
 \dot{r} &= V_r, \\
 \dot{V}_r &= r \cdot \left[(V_{\theta} + \omega)^2 + \frac{\omega^2 \cdot (3 \cdot \cos^2 \theta - 1)}{1 + e \cdot \cos \vartheta} \right] - \frac{T}{m_A}, \\
 \dot{\vartheta} &= \mu^{1/2} p^{-3/2} (1 + e \cdot \cos \vartheta)^2, \\
 \dot{\omega} &= -2 \cdot \omega^2 \frac{e \cdot \sin \vartheta}{1 + e \cdot \cos \vartheta},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где θ – угол разворота СК в плоскости орбиты БКА, V_{θ} – скорость изменения угла разворота СК в плоскости орбиты БКА, r – длина троса, V_r – скорость выпуска троса, ϑ – угол истинной аномалии БКА, ω – угловая скорость движения БКА по орбите, p , e –

фокальный параметр и эксцентриситет орбиты БКА, T – натяжение троса, m_A – масса СК, μ – гравитационный параметр Земли.

В статье рассматриваются следующие программы управления силой натяжения троса. На первом участке [1,2]:

$$T = m_A \cdot \omega^2 \cdot \left(4,6 \cdot r + 3,5 \cdot \frac{V_r}{\omega} - 1,6 \cdot r_{к1} \right), \quad (2)$$

где $r_{к1}$ – программная длина троса на первом участке (3 км), m_A – масса СК.

На втором этапе рассматривается программа управления силой натяжения троса, ограничивающая скорость выпуска троса, состоящая из трёх участков [3]:

$$T = \begin{cases} T_{\min}, & t < t_1, \\ T_{\text{mid}} = m_A \cdot r \cdot \left[(V_\theta + \omega)^2 + \frac{\omega^2 \cdot (3 \cdot \cos^2 \theta - 1)}{1 + e \cdot \cos \vartheta} \right], & t_1 \leq t \leq t_2, \\ T_{\max}, & t > t_2, \end{cases} \quad (3)$$

где T_{\min} – сила натяжения троса на начальном участке развёртывания ОТС, определяемая конструкцией механизма выпуска троса, T_{mid} – сила натяжения троса, обеспечивающая постоянную скорость выпуска троса (участок постоянной скорости выпуска троса), T_{\max} – сила натяжения троса на конечном участке развёртывания ОТС (участок торможения), t_1 – время достижения заданной скорости выпуска троса, t_2 – время начала участка торможения.

Для программы (3) решается параметрическая краевая задача с граничными условиями:

$$\begin{aligned} t = t^0 : & \quad r = r^0, \quad \theta^0 = 0, \quad V_r^0 = 0, \quad V_\theta^0 = 0, \\ t = t^к : & \quad r = r^к, \quad \theta^к \rightarrow \max, \quad V_r^к = 0, \quad V_\theta^к = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Решение краевой задачи и анализ результатов решения подробно рассмотрены в статье [3]. В настоящей статье принято ограничение на скорость выпуска троса 19 м/с. Программа управления силой натяжения троса от времени и график зависимости скорости выпуска троса от времени на втором этапе развёртывания ОТС показаны на рисунке 1.

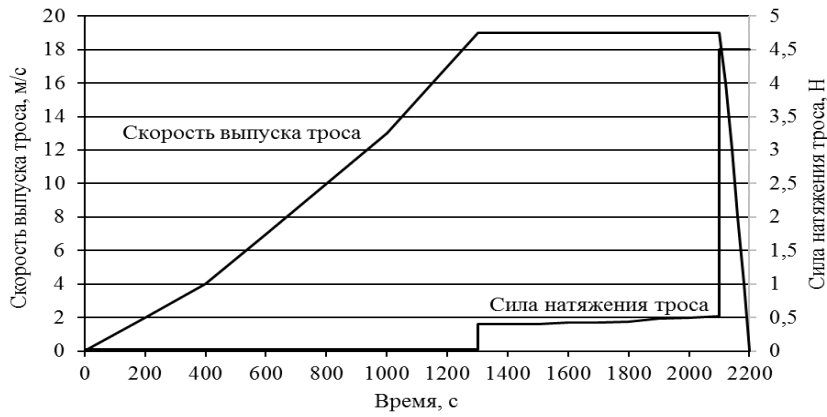


Рисунок 1 – Сила натяжения троса и скорость его выпуска на втором этапе развёртывания ОТС

После отрезания троса, СК получает аналог тормозного импульса и переходит на эллиптическую предпусковую орбиту. Параметры этой орбиты могут быть рассчитаны по формулам:

$$p^k = \mu^{-1} \cdot \left((R^{\text{БКА}} - l \cos \theta)^2 + l^2 \sin^2 \theta \right) \cdot (V_u^{\text{БКА}} - l \cdot V_\theta \cdot \cos \theta)^2, \quad (5)$$

$$\vartheta^k = \arctg \frac{V_r^{\text{БКА}} - l \cdot V_\theta \cdot \sin \theta}{V_u^{\text{БКА}} - \sqrt{\frac{\mu}{p^k}} - l \cdot V_\theta \cdot \cos \theta}, \quad (6)$$

$$e^k = \frac{V_r^{\text{БКА}} - l \cdot V_\theta \cdot \sin \theta}{\sin \vartheta^k} \cdot \sqrt{\frac{p^k}{\mu}}, \quad (7)$$

$$u^k = u^{\text{БКА}} + \arctg \frac{l \cdot \sin \theta}{\sqrt{(R^{\text{БКА}} - l \cos \theta)^2 + l^2 \sin^2 \theta}}, \quad (8)$$

где $p^k, \vartheta^k, e^k, u^k$ – фокальный параметр, угол истинной аномалии, эксцентриситет и аргумент широты орбиты СК, $V_r^{\text{БКА}}$ и $V_u^{\text{БКА}}$ – радиальная и трансверсальная составляющие скорости БКА в момент отрезания троса.

Проводилась оценка разброса точек посадки СК на поверхность Земли. Разброс точек посадки может быть обусловлен погрешностями определения параметров орбиты БКА при формировании программы управления развёртыванием тросовой системы или погрешностью в определении момента отрезания троса (отклонение троса от линии местной вертикали не равно нулю).

Задача формулировалась следующим образом. БКА находится на круговой орбите высотой 350 км (номинальная орбита). При развёртывании тросовой системы используется номинальная программа управления (рисунок 1), рассчитанная для

номинальной орбиты БКА. Необходимо определить степень влияния на разброс точек посадки погрешностей определения:

– высоты круговой орбиты БКА;

– эксцентриситета орбиты БКА. При этом рассматривались два частных случая:

1) фиксированная высота перицентра, равная высоте номинальной орбиты БКА, и варьируемая высота апоцентра орбиты БКА,

2) фиксированная высота апоцентра, равная высоте номинальной орбиты БКА, и варьируемая высота перицентра орбиты БКА;

– угла отклонения троса на некоторый угол θ от линии местной вертикали в момент его отрезания.

Длина троса принималась равной 30 км, масса БКА – 8500 кг, масса СК – 20 кг, диаметр СК – 0,4 м. Считается, что наклонение и долгота восходящего узла орбиты СК и орбиты БКА в момент отрезания троса совпадают.

Результаты расчёта точки посадки СК на поверхности Земли при номинальной программе управления и спуске с номинальной орбиты имеют следующие географические координаты: 42 градуса северной широты, 125 градусов восточной долготы. Трасса БКА и СК показаны на рисунке 2. Цифрой (1) обозначена трасса СК, после отрезания троса, цифрой (2) трасса БКА.

Результаты расчёта отклонений точек посадки СК представлены на рисунке 3.

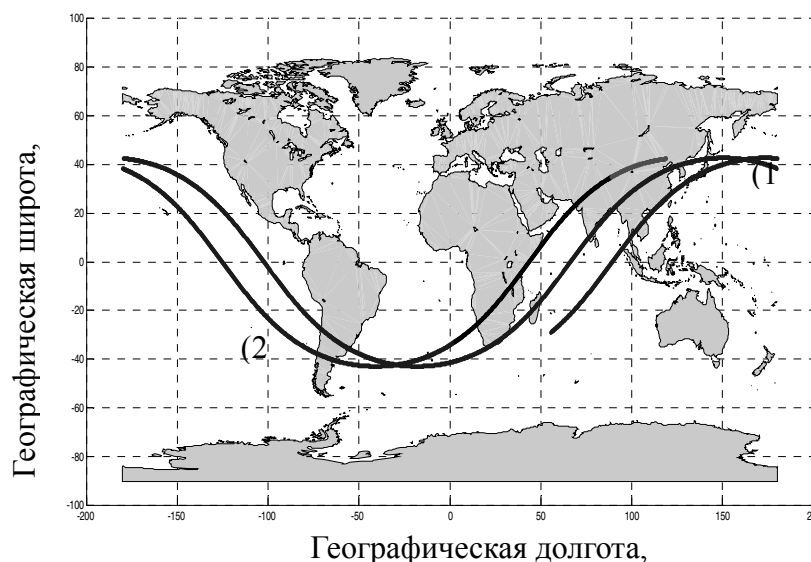


Рисунок 2 – Трасса БКА и СК

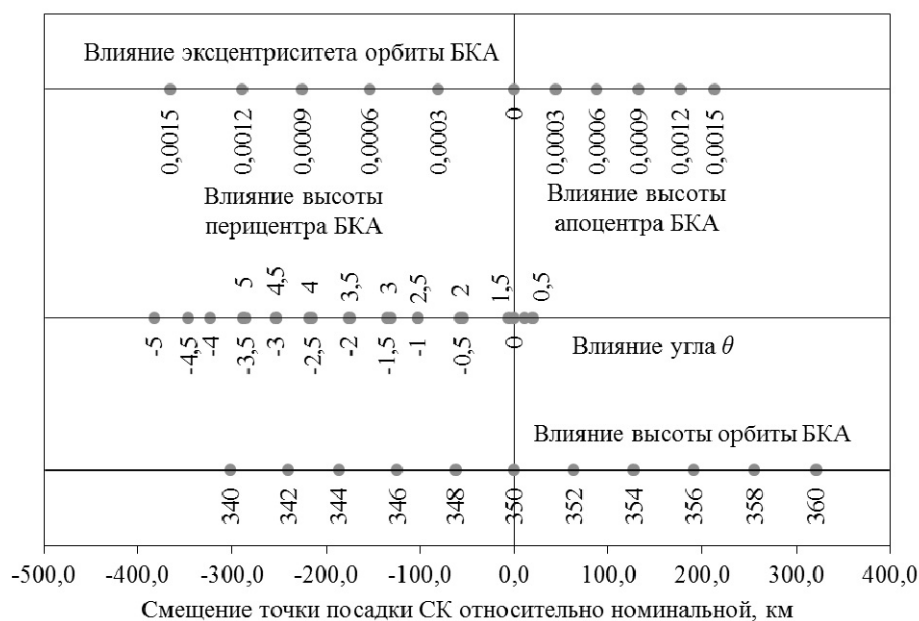


Рисунок 3 – Разброс точек посадки СК

Как видно из рисунка 3, наибольшее влияние на разброс точек посадки СК оказывают отклонения высоты орбиты БКА и её эксцентриситета от номинальных значений. Влияние угла отклонения СК от линии местной вертикали θ в диапазоне от минус 0,5 до 1,5 градусов – незначительно.

Библиографический список

1. Белецкий, В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем [Текст]/В.В. Белецкий, Е.М. Левин. – М.: Наука, 1990. -336 с.
2. Ишков, С.А., Шейников, И.В. Определение параметров орбитальной тросовой системы, предназначенной для спуска малых капсул с орбиты [Текст]/С.А. Ишков, И.В. Шейников//Известия самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – т. 11. –№5-1. –С. 208-215.
3. Ишков, С.А., Сюй Сяое, Фадеенков, П.В. Моделирование движения спускаемой капсулы в составе орбитальной тросовой системы при ограничении на скорость выпуска троса [Текст]/С.А. Ишков, Сюй Сяое, П.В. Фадеенков//Управление движением и навигация летательных аппаратов: Сборник трудов XVII Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов: Часть 1. Самара, 18-20 июня 2014 г. –2015. С. 78-82.