

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СПУСКАЕМОЙ КАПСУЛЫ В СОСТАВЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ НА СКОРОСТЬ ВЫПУСКА ТРОСА

Одним из возможных путей повышения эффективности созданной и разрабатываемой космической техники является использование для космических манёвров и транспортных операций орбитальных тросовых систем (ОТС). В работе под ОТС понимается связка базового космического аппарата (КА), находящегося на околоземной орбите, и соединённой с ним при помощи троса спускаемой капсулы (СК).

Спуск малой СК на тросе с КА, находящегося на околоземной орбите, позволяет доставлять на Землю грузы с высокой экономической эффективностью [1], поскольку не требуется создание капсулы с двигательной установкой. Использование троса позволяет осуществить спуск груза в заданную точку планеты, используя лишь управление натяжением троса [1].

Для широкого применения ОТС в космических транспортных операциях необходима разработка эффективных программ и законов управления при развёртывании, в особенности законов управления относительно номинального движения в условиях возмущений, действующих на связку тел, соединённых тросом.

В данной работе рассматривается задача управления ОТС для определения номинальных программ для различных высот орбит базового аппарата и характеристик ОТС при ограничении на скорость разматывания троса.

Рассматривается следующая схема спуска [2]:

1. С использованием пружинного толкателя СК отбрасывается вниз по направлению местной вертикали.
2. Управляемое движение капсулы с ограничением на скорость разматывания троса до достижения максимального отклонения троса от местной вертикали.
3. Фиксация троса в механизме управления и дальнейшее пассивное маятниковое движение капсулы с тросом.
4. Отрезание троса в момент достижения капсулой местной вертикали и дальнейшее свободное движение и вход капсулы в атмосферу.

Данная схема спуска позволяет осуществить вход СК в плотные слои атмосферы с заданным углом наклона траектории.

Примем следующие допущения:

- орбита центра масс системы невозмущённая;
- центр масс тросовой системы совпадает с центром масс КА;
- трос аппроксимирован прямой, всегда натянутой нитью;
- трос невесомый;
- движение ОТС осуществляется в плоскости орбиты КА.

Соответственно может быть использована известная модель динамики тросовой системы [1]:

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

где θ - угол отклонения троса от местной вертикали; r - длина выпущенного троса; ω - угловая скорость движения КА; $k = 1 + e \cos v$; e , p и v - эксцентриситет, фокальный параметр орбиты и истинная аномалия КА; T - сила натяжения троса; m_A - масса СК.

В отличие от программы управления, состоящей из двух участков [2] (участка минимально возможного натяжения и участка максимально возможного натяжения), при ограничении на скорость выпуска троса программа управления натяжением троса примет следующий вид:

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

Здесь T_{mid} - натяжение троса на начальном участке развёртывания, которое определяется конструкцией механизма выпуска троса; $V_{r \text{ орг}}$ - ограничение скорости выпуска троса; T_{mid} - натяжение для поддержания постоянной скорости выпуска троса (определяется из четвёртого уравнения системы (1)); T_{\max} - натяжение на конечном участке развёртывания ОТС; t_1

- момент достижения заданной скорости выпуска троса; t_2 - время начала торможения с максимальным натяжением.

Графики изменения скорости выпуска троса при релейной программе и программе развёртывания с ограничением на скорость выпуска троса показаны на рисунке 1.

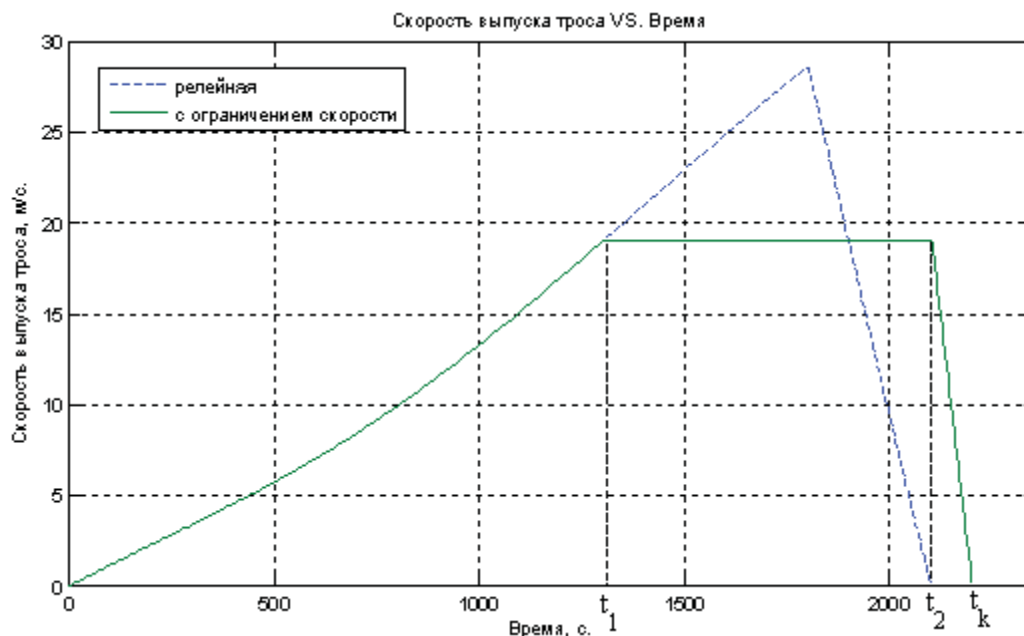


Рисунок 1 – Программы развёртывания ОТС

Для закона (2) проводилось численное решение краевой параметрической задачи (1) для следующих граничных условий (индексами Н и К отмечены начальные и конечные условия интегрирования):

$$t = 0, \theta_H = 0, r = r_H, V_{rH} = 0, V_{\theta H} = 0,$$

$$t = t_K, r = r_K, V_{rK} = 0, V_{\theta K} = 0$$

при нефиксированном значении угла θ_K .

В качестве подбираемых параметров использовались натяжение на конечном участке разматывания T_{\max} и время окончания второго участка t_2 . Невязки подсчитывались для значений r_K, V_{rK} и $V_{\theta K}$.

Было проведено моделирование для движения КА (китайской космической станции) по эллиптической орбите с следующими параметрами: перигей - 343 км, апогей - 362 км.

На рисунках 2, 3 приведены графики зависимостей скоростей выпуска троса и силы натяжения троса длиной 30 км при разных ограничениях на скорость выпуска троса (РП – максимальная скорость выпуска троса при релейной программе).

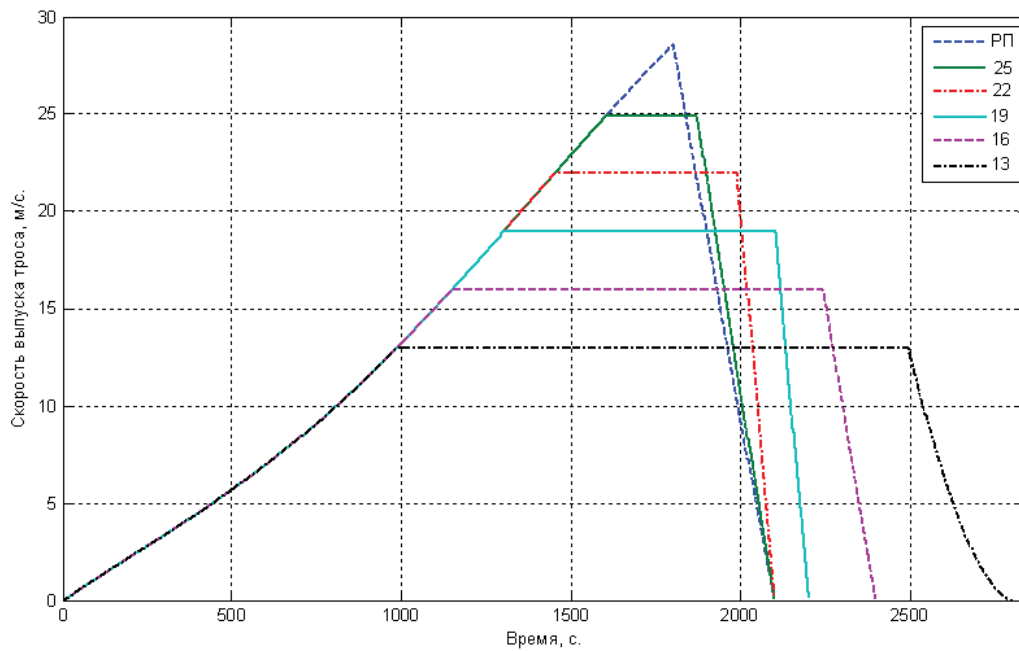


Рисунок 2 – Скорости развёртывания

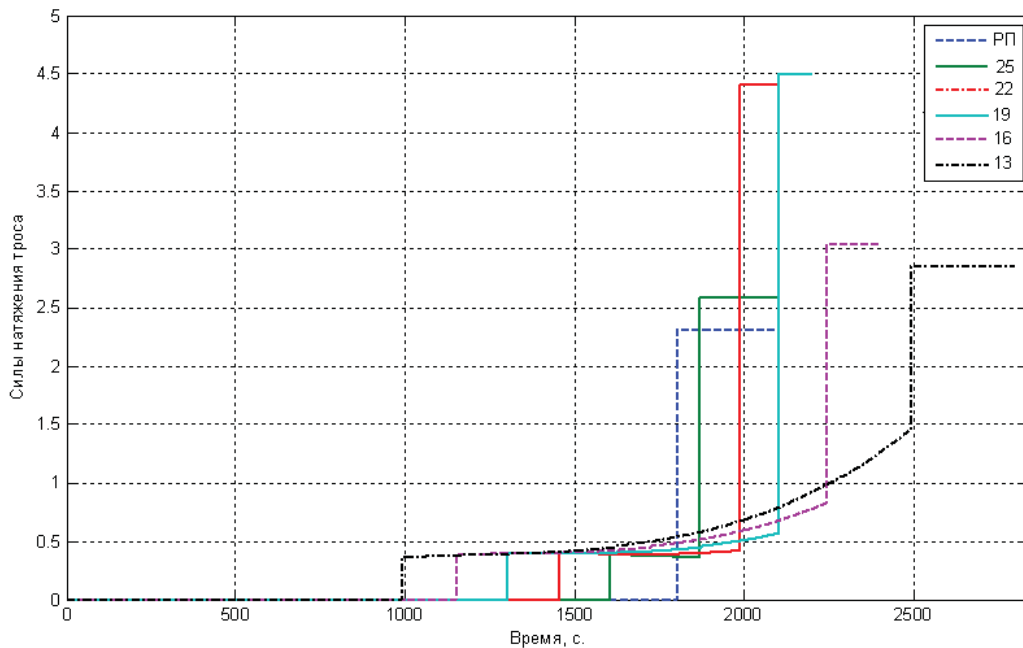


Рисунок 3 – Силы натяжения

Из рисунка 3 следует, что сила натяжения на конечном участке развёртывания при ограничении скорости до 19 м/с превышает силу натяжения при релейной программе: существенно возрастает (до двух раз) и плавно снижается при ограничении скорости от 19 м/с до 13 м/с. При ограничении на скорость выпуска троса наблюдается продолжительный участок плавного увеличения натяжения, тем больший, чем меньше ограничение на скорость. При ограничении в 13 м/с участок плавного увеличения натяжения заканчивается при натяжении, почти достигающем натяжения для релейной программы развёртывания.

На рисунке 4 приведены графики зависимостей величины угла отклонения троса от

вертикали от ограничения на скорость выпуска для длин троса 30000, 35000 и 40000 м.

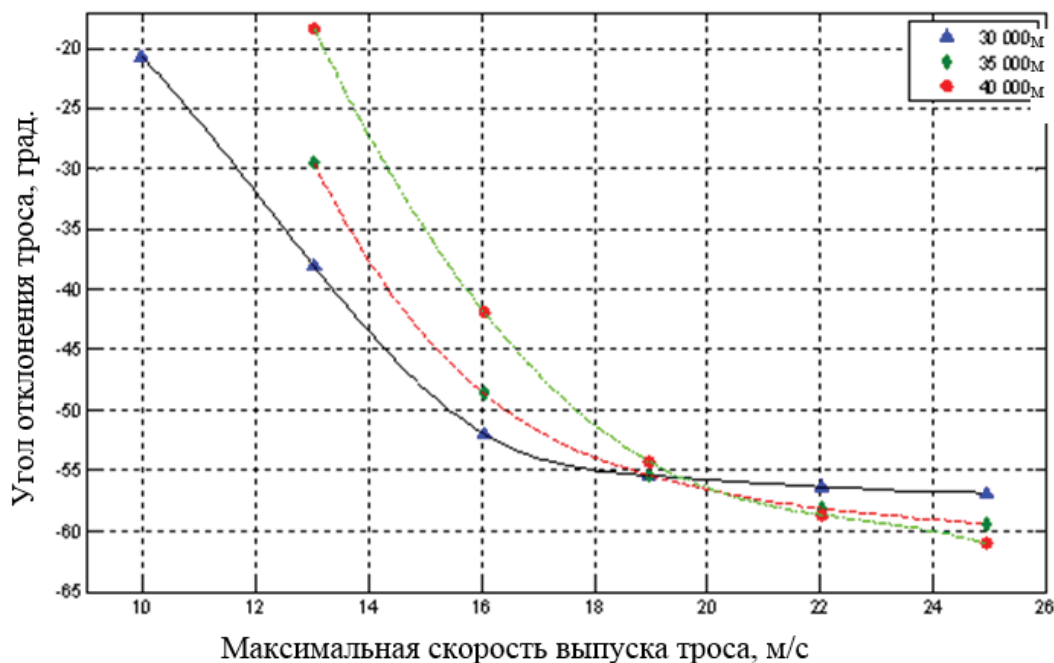


Рисунок 4 – Зависимость величины угла отклонения троса от вертикали

Из рисунка видно, что уменьшение максимальной скорости развёртывания приводит к уменьшению угла отклонения троса от вертикали. При максимальной скорости развёртывания 19 м/с наблюдается характерный изгиб, после которого изменение угла отклонения троса не превышает пяти градусов.

По проведённым исследованиям можно сделать следующие выводы:

- ограничение на скорость выпуска троса приводит к увеличению силы натяжения троса на конечном участке;
- поддержание меньших скоростей выпуска троса обеспечивается программой плавного увеличения натяжения, что в отличие от релейной программы может обеспечить большую безопасность развёртывания ОТС;
- поддержание меньших скоростей выпуска троса приводит к уменьшению угла отклонения троса от вертикали, что увеличит скорость и уменьшит угол входа спускаемой капсулы в атмосферу.

Библиографический список

- 1 Динамика космических тросовых систем [Текст] / В. В. Белецкий, Е. М. Левин. - М. : Наука, 1990. - 330 с.
- 2 Ишков С.А., Наумов С.А. Управление развёртыванием орбитальной тросовой системы [Текст] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени С.П. Королева. – Самара. – 2006. Вып – 1 (9). – С. 81 - 90.