

Лаптев Е. В., Божко Н. Р.

О МНОГОРАЗОВОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СПУСКА ГРУЗОВ С ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЫ

Рассматривается задача использования орбитальной тросовой системы (ОТС) для многоразового спуска грузов с околоземной орбиты. Необходимость её решения возникает, например, при подготовке межпланетной экспедиции, для осуществления которой космический корабль может создаваться на околоземной орбите из отдельных частей и функциональных модулей, доставляемых на неё с помощью грузовых кораблей. Накапливающиеся при этом отходы и неиспользуемые части грузовых кораблей целесообразно периодически утилизировать путём их спуска с орбиты для входа в атмосферу и сгорания в ней.

Для осуществления этого система управления ОТС должна обеспечивать:

- отделение спускаемого груза (СГ) от базового КА;
- выпуск троса с закреплённым на нём грузом по заданному закону;
- отделение груза от конечного устройства по окончании выпуска троса;
- втягивание троса для последующего спуска нового груза.

Вопросы выбора закона управления троса и влияния параметров отделения груза от КА на процесс развёртывания ОТС рассмотрены в работе [1].

В соответствии с полученными в ней результатами:

- отделение груза от КА должно производиться в направлении, обеспечивающем развёртывание ОТС вниз к местной вертикали;
- управление выпуском троса должно осуществляться кинематическим способом путём изменения скорости его выпуска по кусочно-линейному или синусоидальному закону.

Выполнение указанных рекомендаций обеспечивает плавное и непрерывное изменение скорости выпуска троса от нулевого значения в начале и до нулевого значения в конце выпуска, что позволяет исключить опасность его обрыва и производить отделение груза от КА с минимальными импульсами независимо от их масс.

В связи с тем, что с орбиты могут спускаться разные грузы, было проведено моделирование развёртывания ОТС при различных массах отделяемого груза и КА. Моделирование проведено методом раздельного пошагового интегрирования уравнений движения объектов ОТС [2]. В качестве исходных данных принято: орбита КА круговая с $H_{кр}=350$ км; масса КА $m_{ка}=20000$ кг и $m_{ка}=100000$ кг; масса спускаемого груза ($m_{сг}$) от 100 до 2000 кг; импульс отделения груза от КА $\Delta V_{отд}=0,2$ м/с; длина выпускаемого троса $L_{п}=30000$ м.

Управление выпуском троса осуществляется по синусоидальному закону

$$V_{\text{тр}} = A_m \sin \frac{2A_m}{L_{\text{п}}} t, \quad (1)$$

где $A_m = 8$ м/с.

Из полученных результатов моделирования следует, что

– кинематические параметры развёртывания ОТС (траектории движения СГ, изменение его углового положения относительно местной вертикали и т.п.) от соотношения масс отделяемого груза и КА практически не зависят и соответствуют приведённым на рисунках 1, 2;

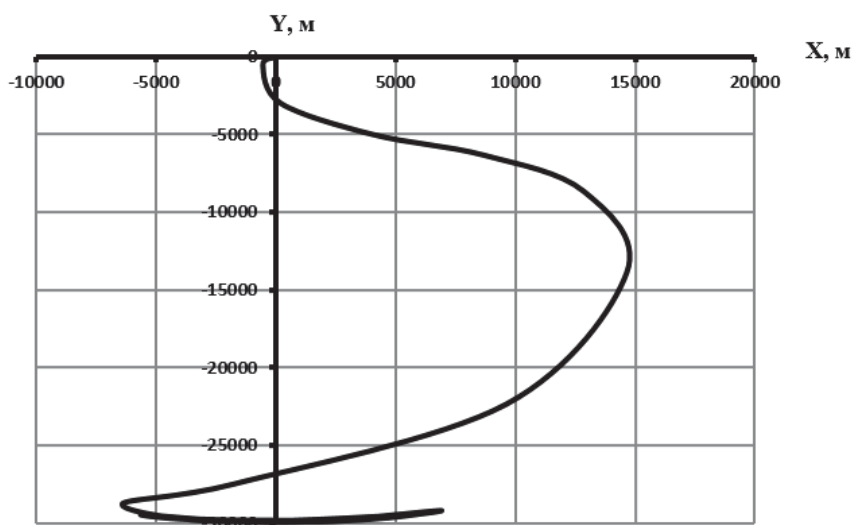


Рисунок 1 - Траектория движения СГ в плоскости орбиты КА при выпуске троса по синусоидальному закону $V_{\text{тр}} = A_m \cdot \sin(\pi/T * t)$

$A_{\text{отд}} = 180^\circ$ $A_m = 8$ $\Delta V_{\text{отд}} = 0,2$ м/с $m_{\text{КА}} = 5000-100000$ кг $m_{\text{СГ}} = 50-2000$ кг

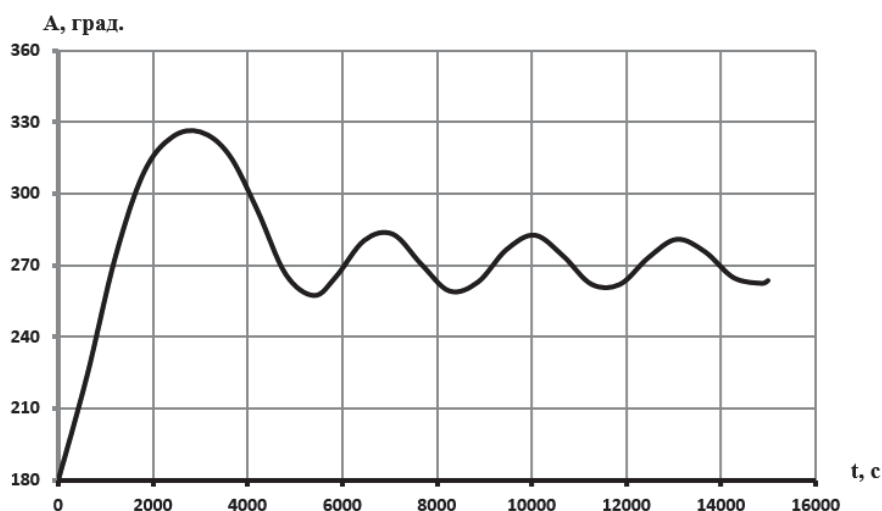


Рисунок 2 - Изменение углового положения СГ в плоскости орбиты КА от времени при выпуске троса по синусоидальному закону $V_{\text{тр}} = A_m \cdot \sin(\pi/T * t)$

$A_{\text{отд}} = 180^\circ$ $A_m = 8$ $\Delta V_{\text{отд}} = 0,2$ м/с $m_{\text{КА}} = 5000-100000$ кг $m_{\text{СГ}} = 50-2000$ кг

– от соотношения масс существенно зависит только сила натяжения троса, изменение которой в процессе развёртывания ОТС при различных массах груза и КА показано на

рисунках 3, 4.

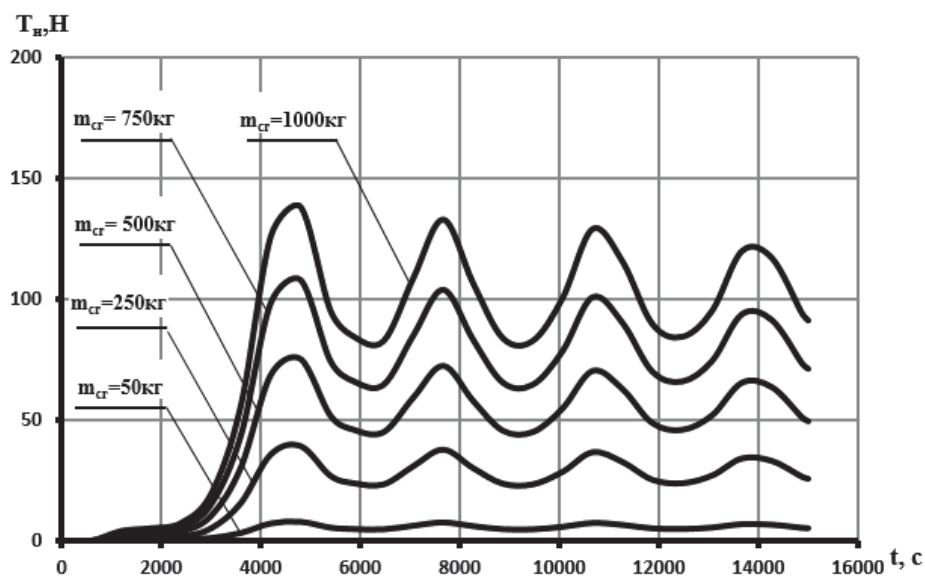


Рисунок 3 - Изменение силы натяжения троса от времени и массы СГ при его выпуске по синусоидальному закону $V_{тр} = A_m \cdot \sin(\pi/T \cdot t)$
 $A_m = 8$ $\Delta V_{отд} = 0,2$ м/с $m_{КА} = 5000$ кг

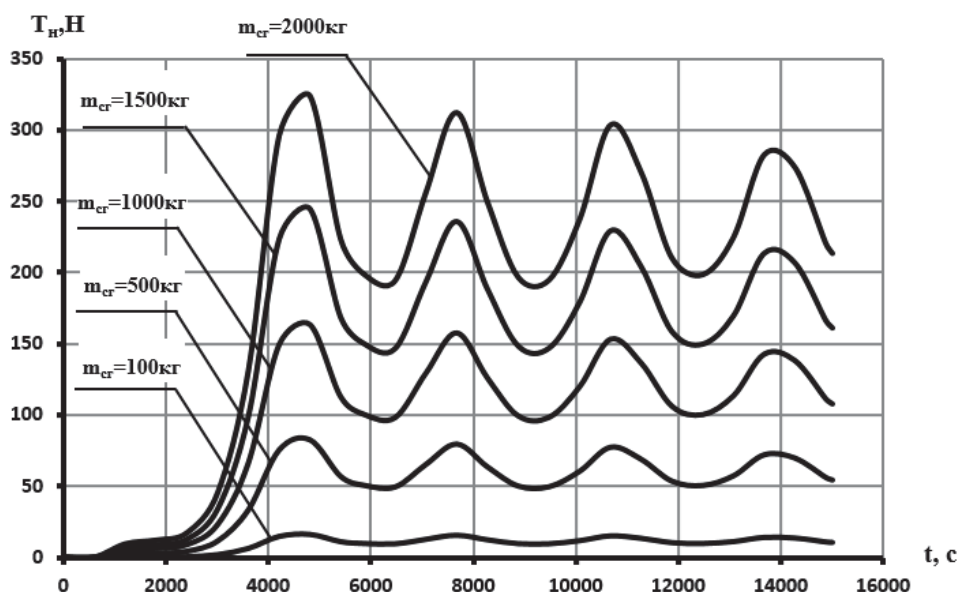


Рисунок 4 - Изменение силы натяжения троса от времени и массы СГ при его выпуске по синусоидальному закону $V_{тр} = A_m \cdot \sin(\pi/T \cdot t)$
 $A_m = 8$ $\Delta V_{отд} = 0,2$ м/с $m_{КА} = 100000$ кг

Из приведённых данных следует, что при синусоидальном законе управления (1) выпуском троса с рассматриваемой орбиты КА с силой натяжения не более 350 Н могут спускаться грузы до 2000 кг.

Аналогичные результаты имеют место и при использовании кусочно-линейного закона управления выпуском троса.

Отделение груза от троса может осуществляться либо сразу после окончания его выпуска, либо с некоторой задержкой, что влияет на параметры спуска груза и условия его

входа в атмосферу. Углы ($\theta_{вх}$) и скорости ($V_{вх}$) входа груза в атмосферу на высоте $H=110$ км в зависимости от величины задержки отделения груза от троса ($\Delta t_{зад}$), отсчитываемой от момента окончания его выпуска, при спуске при перечисленных выше исходных данных и $L_{п}=45000$ м приведены в таблице 1. Значение $\Delta t_{зад} = 0$ соответствует максимальному отклонению груза от местной вертикали в сторону против направления полёта КА; $\Delta t_{зад} = 1000$ с - моменту прохождения грузом местной вертикали при его движении по направлению полёта КА; $\Delta t_{зад} = 1700$ с - максимальному отклонению груза от местной вертикали в сторону по направлению полёта КА; $\Delta t_{зад} = 2500$ с - моменту прохождения грузом местной вертикали при его движении против направления полёта КА.

Приведено отличие скорости груза от круговой ($\Delta V_{гр} = V_{гр} - V_{кр}$) в точке, совпадающей с моментом его отделения от троса, эквивалентное сообщению грузу тормозного импульса соответствующей величины.

Таблица 1

$\Delta t_{зад}, с$	0	1000	1700	2500
$\Delta V_{гр}, м/с$	-59	-40	-45	-63
$\theta_{вх}, град.$	-1,045	-0,334	-0,932	-1,337
$V_{вх}, м/с$	7879,7	7895,6	7881,2	7861,6

Из данных таблицы 1 следует, что наилучшие условия входа в атмосферу и спуска груза обеспечиваются при его отделении от троса в момент прохождения местной вертикали при его движении против направления полёта КА.

Для последующего спуска нового груза трос необходимо втянуть на базовый КА. Втягивание троса при этом может осуществляться с постоянной или переменной скоростью, а в качестве законов управления могут использоваться те же законы, что и при выпуске троса для развёртывания ОТС.

Типовые траектории движения концевого устройства при втягивании троса с постоянной скоростью и по кусочно-линейному закону показаны на рисунках 5, 6. Из них следует, что в процессе втягивания трос начинает совершать колебания относительно местной вертикали, переходящие к концу втягивания во вращение вокруг КА с увеличивающейся угловой скоростью. Исследования показали, что переход троса во вращение вокруг КА к концу втягивания будет происходить при любых начальных условиях втягивания, любом законе изменения скорости втягивания троса и тем раньше, чем быстрее будет втягиваться трос.

Указанное обстоятельство существенно затрудняет возможность использования ОТС для многоразового спуска грузов с орбиты КА.

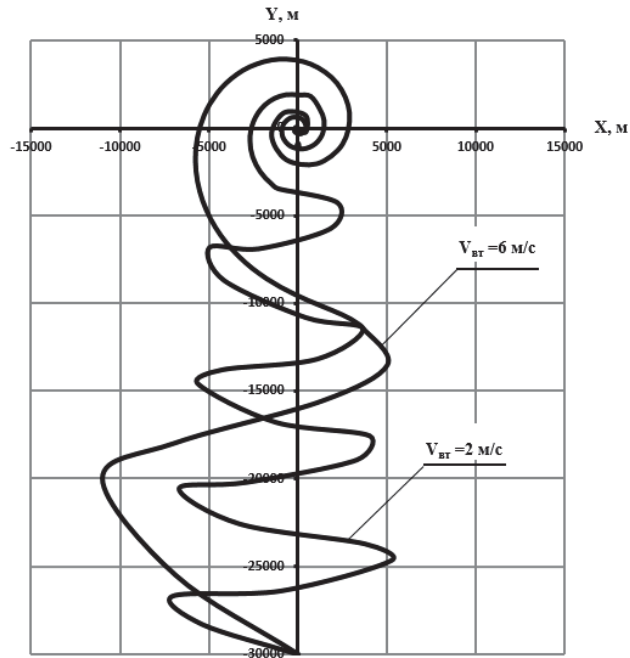


Рисунок 5 - Траектории движения концевой устройства при втягивании троса с постоянной скоростью $V_{вт} = \text{const}$

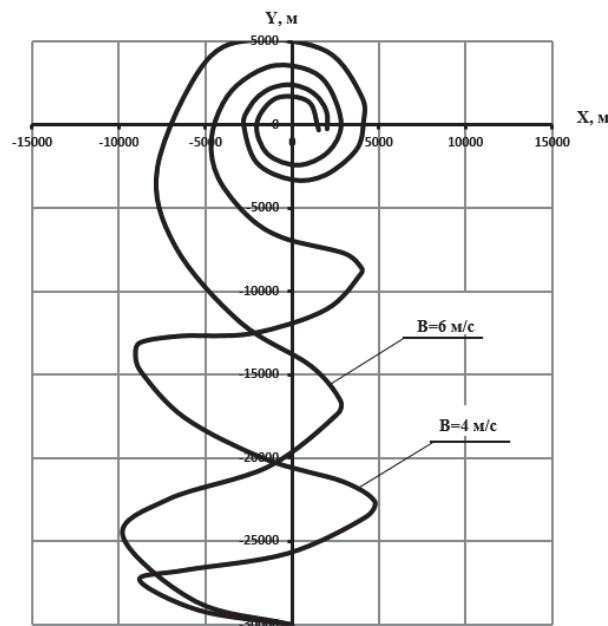


Рисунок 6 - Траектории движения концевой устройства при втягивании троса по кусочно-линейному закону $V_{вт} = V(V, k1, k2)$, $V = (4-6)$ м/с, $k1=0.2$, $k2=0.2$

Библиографический список

- 1 Лаптев Е.В. Кинематические законы управления выпуском троса при развертывании ОТС. Сборник научных трудов XVII Всероссийского семинара по управлению движением и навигации ЛА. Самара, 18-20 июня 2014 г., ч.1., 2014 г. С. 73-78.
- 2 Лаптев Е.В. Метод отдельного пошагового моделирования движения орбитальной тросовой системы. Сборник научных трудов XIV Всероссийского семинара по управлению движением и навигации ЛА. Самара, 8-10 июня 2009 г., ч.1., 2011 г. С. 148-151.