

На правах рукописи

**СТРАТИЛАТОВ Николай Ремирович**

**ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ  
ДЛЯ ДОСТАВКИ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ НА ЗЕМЛЮ**

Специальность 01.02.01 - "Теоретическая механика"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)" (СГАУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Асланов Владимир Степанович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Балакин Виктор Леонидович

доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Садов Юрий Андреевич

Ведущее предприятие: Федеральное государственное унитарное  
предприятие "Центральный научно-  
исследовательский институт  
машиностроения" (ФГУП ЦНИИ маш)

Защита состоится "8" октября 2010 г. в 14 часов  
на заседании диссертационного совета Д212.215.07 при Государственном  
образовательном учреждении высшего профессионального образования  
"Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика  
С.П. Королева (национальный исследовательский университет)" по адресу  
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан "6" сентября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.215.07  
доктор технических наук,  
профессор

И.В. Белоконов

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Для доставки груза с орбиты на поверхность планет традиционно используются спускаемые аппараты и капсулы, переводимые на орбиту спуска с помощью реактивных двигателей. В последние десятилетия активно ведутся работы по созданию альтернативной схемы доставки груза с использованием космических тросовых систем (КТС), состоящих из космического аппарата (КА), троса и спускаемой (возвращаемой) капсулы с полезной нагрузкой (груз). Главным достоинством этой схемы является снижение стоимости осуществления маневра за счёт отказа от использования реактивного топлива и двигательной установки на возвращаемой капсуле с нагрузкой.

Суть транспортной операции доставки груза с орбиты с помощью тросовой системы качественно можно описать следующим образом. С находящегося на орбите КА в вертикальном направлении с некоторой скоростью выпускается груз, скрепленный с ним гибким тросом. Под действием кориолисовой силы он отклоняется от местной вертикали в сторону направления движения КА. По мере увеличения длины троса высота груза над поверхностью Земли будет уменьшаться, а гравитационное ускорение, действующее на груз, будет увеличиваться по сравнению с аналогичным ускорением, действующим на КА. За счет этого груз совершит возвратное движение. Находясь в окрестности местной вертикали КА, груз будет иметь скорость меньшую, чем скорость КА. Другими словами, за счет возвратного движения груз получит отрицательное приращение к орбитальной скорости, эквивалентное тормозному импульсу. Если на этом этапе разорвать трос, то груз по определённой траектории совершит спуск в атмосферу.

Описанная транспортная операция была реализована в 2007г. в рамках российско-европейского эксперимента "Young Engineers' Satellite 2 - YES2". Со спутника "Фотон-М" №3, движущегося на высоте порядка 250 км, отделялась капсула, установленная на нём и скреплённая с ним тросом. При достижении расчётной длины троса (около 30 км) происходил его принудительный разрыв, и капсула по баллистической траектории совершала спуск на поверхность Земли. Автор принимал участие в подготовке и выпуске ряда документов по эксперименту. Проектные параметры КА "Фотон-М" №3, циклограмма проведения эксперимента и итоговый отчет были разработаны при его непосредственном участии. В результате эксперимента была показана принципиальная возможность осуществления доставки груза с помощью троса, однако потеря спускаемой капсулы с полезным грузом в реальном эксперименте указывает на необходимость более детального изучения динамики движения элементов системы.

Проблеме изучения динамики КТС в научной литературе уделено большое внимание. основополагающей работой в этой области является монография В.В. Белецкого и Е.М. Левина. В ней содержится обобщение и

дополнение тех результатов, которые были получены в науке применительно к тросам в космосе вплоть до середины 80-х годов прошлого столетия. Среди других обзорных работ следует особо отметить вышедшую недавно статью М.П. Картмелла и Д.Д. Мак-Кензи, в которой в доступной форме дается обзор существующих к настоящему времени научных работ и экспериментов с использованием КТС. Среди множества работ, посвященных проблеме разработки и использования КТС, можно выделить несколько направлений. Часть исследователей занималась общими вопросами динамики КТС. Другие - проработкой вопросов, связанных с устойчивостью и надежностью поведения тросов на орбите, а также вопросов поиска новых и усовершенствованием уже существующих методов стабилизации. Большая часть работ посвящена разработке и усовершенствованию математических моделей, описывающих тросовые системы в космосе. Ряд научных и отчасти популяризирующих статей направлены на поиск и разработку новых путей использования КТС. И, наконец, несколько публикаций характеризуют направление, где основные усилия авторов сосредоточены на решении задачи управления развертыванием (свертыванием) троса с КА, находящегося на орбите, с разными критериями эффективности.

Анализ работ показывает, что не все вопросы динамики тросовых систем нашли в них свое отражение. В частности, для исследования динамики троса в процессе развертывания используются весьма приближенные математические модели без учёта динамики несущего КА. За рамками исследований остаются вопросы влияния развертывания тросовой системы и системы управления движением несущего КА на его вращательное движение. Для задачи развертывания КТС не исследованы потенциально возможные нештатные ситуации. Настоящая диссертационная работа посвящена совместному анализу динамики КТС и КА в процессе доставки полезной нагрузки на Землю.

**Актуальность** настоящей работы обусловлена практической необходимостью решения задачи доставки полезного груза с орбиты на Землю, определяется возможностью снижения стоимости этой транспортной операции за счёт отказа от использования тормозных двигателей и ракетного топлива на борту возвращаемой капсулы (нагрузки) и связана с развитием общих задач исследования динамики КТС переменной конфигурации.

**Целью работы** является исследование динамики КТС совместно с КА на основе математических моделей, описывающих движение КТС переменной конфигурации с учетом движения несущего КА относительно его центра масс, изучение с их помощью задачи доставки нагрузки (груза) с орбиты и анализа влияния возможных отказов системы управления движением КА.

**Объектом исследования** является КТС, представляющая собой связку из несущего КА и груза, соединенных гибкой связью (тросом), используемая для спуска полезной нагрузки на Землю.

**Предметом исследования** является динамика КТС реального космического эксперимента КА "Фотон-М" №3 – YES2" со спуском груза с орбиты на основе построенных математических моделей, позволяющих провести качественный и количественный анализ изучаемых движений КТС с учетом вращения КА вокруг центра масс и отказов системы управления движением.

**Основными методами исследований**, используемыми в работе, являются методы теоретической механики, теории колебаний, асимптотические и численные методы решения дифференциальных уравнений.

**Научная новизна работы состоит в следующем:**

1. Построена пространственная дискретная модель КТС с весомым, гибким, вязкоупругим тросом переменной длины, учитывающая влияние атмосферы на трос.
2. Разработана математическая модель, описывающая плоское движение КА относительно центра масс в процессе развертывания тросовой системы.
3. Получены приближенные аналитические решения, описывающие изменение амплитуды колебаний КА, вызванное изменением величины и направления силы натяжения троса.
4. Получена приближенная аналитическая зависимость, позволяющая оценить уровень микроускорений, возникающих на борту КА в процессе развертывания троса.
5. Разработаны модели потенциально возможных нештатных ситуаций, связанных с отказами в системе управления движением КА и в механизме развертывания троса.

**Практическая ценность работы** заключается в возможности использования разработанных математических моделей и аналитических зависимостей для исследования движения КТС и КА в штатных и нештатных режимах их функционирования.

**Апробация результатов**, полученных в диссертации, проведена на XIII и XIV Всероссийских научно-технических семинарах по управлению движением и навигации летательных аппаратов (Самара, 2007 г., 2009 г.).

Математические модели были использованы при разработке программного комплекса моделирования движения КТС:

- "Разработка программного комплекса моделирования характеристик движения тросовой системы КА "Фотон-М" №3—"MASS-FOTINO" (2007 г.).
- "Послеполетный анализ динамики орбитальной тросовой системы YES2 по данным аппаратуры MASS, NORAD (ЕКА) и аппаратуры SSAU-YES2 (СГАУ)" (2008 г.) .

Результаты исследований вошли в научно-технические отчеты ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ - Прогресс", в отчеты по проекту Российского фонда фундаментальных исследований №06-01-00355-а "Возмущенное движение

систем твердых тел постоянного и переменного состава", а также были внедрены в учебный процесс кафедры теоретической механики Самарского государственного аэрокосмического университета.

**Достоверность результатов** обеспечивается корректностью математической постановки задачи, строгостью применяемых методов решения, а также соответствием полученных аналитических результатов с результатами численных расчетов.

**Публикации.** Результаты исследований опубликованы в 9 печатных работах по теме диссертации, из них 4 - в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, определенных высшей аттестационной комиссией:

- Общероссийский научно-технический журнал "Полет",
- Вестник Самарского государственного университета,
- Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 109 наименований. Общий объем диссертации составляет 124 страницы.

**На защиту выносятся следующие результаты:**

1. Пространственная дискретная модель КТС с весомым, гибким, вязкоупругим тросом переменной длины, учитывающая влияние атмосферы на трос.
2. Математическая модель, описывающая плоское движение КА относительно центра масс в процессе развёртывания тросовой системы.
3. Приближённые аналитические решения, описывающие амплитуду колебаний КА, вызванную изменением величины и направления силы натяжения троса.
4. Приближённая оценка уровня микроускорений, возникающих на борту КА в процессе развёртывания троса.
5. Модели возможных нештатных ситуаций, связанных с отказами в системе управления движением КА и в механизме развёртывания троса.

### **Содержание работы**

Во **введении** приводится характеристика решаемой в диссертации задачи, обосновывается актуальность темы, формулируются цель диссертации, объект и предмет исследований. Описываются результаты, выносимые на защиту, и сведения об апробации работы и публикациях.

В **первой главе** рассматриваются универсальные свойства КТС, приводится краткий обзор задач, где они могли бы найти свое применение: подробно рассматривается задача доставки груза с орбиты на Землю с использованием КТС; типы математических моделей, используемых при изучении тросовых систем; затрагиваются вопросы управления элементами КТС.

Сравниваются статическая и динамическая схемы развертывания. При статическом развертывании груз в течение всего маневра находится в некоторой окрестности местной вертикали. Основная идея динамического развертывания заключается в дополнительном уменьшении скорости груза за счёт возвратного движения (рис. 1). Развертывание троса осуществляется с достаточно большой скоростью. Под действием кориолисовой силы, пропорциональной относительной скорости движения груза, он отклоняется от местной вертикали в сторону направления движения КА. По мере увеличения длины троса высота груза над поверхностью Земли будет уменьшаться, а гравитационное ускорение, действующее на груз, будет увеличиваться по сравнению с аналогичным ускорением, действующим на КА, за счет этого груз совершит возвратное движение в направлении вертикали КА. Находясь в окрестности этой вертикали, груз будет иметь скорость меньшую, чем скорость КА. За счет возвратного движения груз получит отрицательное приращение к орбитальной скорости, эквивалентное тормозному импульсу. Если на этом этапе принудительно разорвать трос, то груз по баллистической траектории совершит спуск в атмосферу.



Рисунок 1 – Схема маневра при динамическом развертывании КТС

Динамическая схема развертывания была использована при проведении эксперимента на КА "Фотон-М" №3–YES2", в ходе которого была практически реализована схема спуска груза с орбиты на Землю без затрат ракетного топлива с помощью КТС. В главе дается краткий обзор этого эксперимента.

Во **второй** главе построена модель КТС с невесомым абсолютно неупругим тросом при следующих допущениях: соединенные тела рассматриваются как материальные точки; движение считается плоским; не учитывается влияние атмосферы на трос; считается, что длина троса во много раз меньше радиуса орбиты КТС, но во много раз превосходит размеры конечных тел. Выводятся уравнения движения спутника по возмущенной орбите, отличающейся от кеплеровской только влиянием атмосферы; а также уравнения движения груза в неинерциальной вращающейся системе координат, связанной со спутником. При исследовании движения КТС часто требуется определять не координаты груза, а длину троса  $\rho$ , скорость его выпуска  $\dot{\rho}$  и угол отклонения троса от местной вертикали  $\varphi$ . В связи с этим, уравнения движения груза записаны также в переменных  $(\rho, \varphi)$ .

В **третьей** главе построена многоточечная пространственная модель КТС. Полученные в предыдущей главе уравнения удобно использовать для

предварительных расчетов. В случаях, когда требуется большая точность, можно использовать нелинейную модель с распределенными параметрами. Главной ее особенностью является то, что в граничные условия уравнения троса входят старшие производные по времени того же порядка, что и в самом этом уравнении. Это вносит основную трудность при реализации алгоритмов численного интегрирования данных уравнений в частных производных. Другой, не менее значительной трудностью является непременное условие, чтобы шаг интегрирования по времени, который определяется скоростью распространения продольных колебаний вдоль троса, был очень мал. Поэтому создание устойчивой разностной схемы численного решения уравнений представляет собой сложную задачу.

Альтернативой модели с распределенными параметрами, дающей приемлемую точность результата при относительно небольших объемах вычислений, является дискретная модель, в которой трос рассматривается как совокупность точечных масс. Разделим трос на  $N$  участков конечной длины  $\Delta L_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ), и каждый из участков заменим эквивалентной с точки зрения динамики точкой, масса которой равна  $m_i$ . Упругие и демпфирующие свойства троса учтем с помощью закона растяжимости:

$$T_i = \begin{cases} E(\gamma_i - 1) + D_i \frac{\partial \gamma_i}{\partial t}, & \gamma_i > 1, \\ 0, & \gamma_i \leq 1, \end{cases} \quad i = 1, \dots, N+1, \quad (1)$$

где  $T_i$  - натяжение  $i$ -го участка троса,

$E$  - модуль упругости,

$\gamma_i = \rho_i / l_i$  - удлинение,

$\rho_i$  - длина  $i$ -го участка деформированного троса,

$l_i$  - длина недеформированного участка троса,

$D_i = \sqrt{ES_i m_i l_i^{-1}} \eta$  - коэффициент внутреннего трения для случая продольных колебаний участка троса,

$S_i$  - площадь участка троса,

$\eta$  - коэффициент потерь,  $m_i$  - масса  $i$ -ой точки.

Точка  $i = 0$  соответствует КА, а  $i = N + 1$  - спускаемому грузу.

Учитывается взаимодействие каждого элемента троса с атмосферой.

При расчете действующей на участок троса аэродинамической силы он представляется в виде изогнутого в середине цилиндрического стержня. Будем считать, что половины участков  $\rho_i$  и  $\rho_{i+1}$ , примыкающие к  $i$ -ой точечной массе троса, движутся поступательно со скоростью этой массы, а половины, примыкающие к спутнику и к грузу, движутся со скоростями, соответственно, спутника и груза. Будем также считать, что на протяжении всего рассматриваемого участка троса плотность атмосферы постоянна.

Будем учитывать только силу аэродинамического сопротивления:

$$X_i = \begin{cases} \rho_{a_0} V_0^2 (c_{xT} S_0 + c_{xA} S_A) / 2, & i = 0, \\ \rho_{a_i} V_i^2 c_{xT} S_i / 2, & i = 1 \dots N, \\ \rho_{a_{N+1}} V_{N+1}^2 (c_{xT} S_{N+1} + c_{xB} S_B) / 2, & i = N+1 \end{cases}, \text{ где} \quad (2)$$

$c_{xT} \approx 1.2$  - коэффициент аэродинамического сопротивления цилиндра,

$c_{xA}$  - коэффициент аэродинамического сопротивления спутника,

$c_{xB}$  - коэффициент аэродинамического сопротивления груза,

$\rho_{a_i}$  - плотность атмосферы в точке  $i$ ,

$V_i$  - скорость движения  $i$ -ой точки,

$S_A$  - площадь миделевого сечения спутника,

$S_B$  - площадь миделевого сечения груза,

$S_i$  - площадь участка троса, перпендикулярная направлению скорости  $i$ -ой точки. Площадь  $S_i$  определяется следующим соотношением:

$$S_i = \frac{d_T}{2} (\rho_i \sin \varphi_{1,i} + \rho_{i+1} \sin \varphi_{2,i}), \quad i = 1 \dots N, \text{ где}$$

$d_T$  - диаметр троса,

$\varphi_{1,i}, \varphi_{2,i}$  - угол между участками  $\rho_i, \rho_{i+1}$  и вектором скорости  $V_i$ .

При моделировании принимаем  $\rho_{-1} = \rho_{N+2} = 0$ .

В третьей главе с помощью основного уравнения динамики получены уравнения движения  $i$ -ой точки рассматриваемой механической системы. Уравнения движения точечных масс, КА ( $i=0$ ) и груза ( $i=N+1$ ) имеют одну и ту же форму.

$$\dot{x}_i = V_{xi}, \quad \dot{y}_i = V_{yi}, \quad \dot{z}_i = V_{zi}, \quad i = 0 \dots k+1$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{x_i} m_i &= - \left( \frac{3\bar{c}_{20} R_9^2}{2R_i^2} \left( 5 \frac{z_i^2}{R_i^2} - 1 \right) + \frac{5\bar{c}_{40} R_9^4}{8R_i^4} \left( 3 + \left( 63 \frac{z_i^2}{R_i^2} - 42 \right) \frac{z_i^2}{R_i^2} \right) \right) \frac{\mu m_i x_i}{R_i^3} - \\ & \frac{\mu m_i}{R_i^3} x_i - X_i \frac{\dot{x}_i}{|V_i|} + T_i \frac{x_i - x_{i-1}}{\rho_i} - T_{i+1} \frac{x_{i+1} - x_i}{\rho_{i+1}} + (\omega_3^2 x_i + 2\omega_3 \dot{y}_i) m_i, \\ \dot{V}_{y_i} m_i &= - \left( \frac{3\bar{c}_{20} R_9^2}{2R_i^2} \left( 5 \frac{z_i^2}{R_i^2} - 1 \right) + \frac{5\bar{c}_{40} R_9^4}{8R_i^4} \left( 3 + \left( 63 \frac{z_i^2}{R_i^2} - 42 \right) \frac{z_i^2}{R_i^2} \right) \right) \frac{\mu m_i y_i}{R_i^3} - \\ & \frac{\mu m_i}{R_i^3} y_i - X_i \frac{\dot{y}_i}{|V_i|} + T_i \frac{y_i - y_{i-1}}{\rho_i} - T_{i+1} \frac{y_{i+1} - y_i}{\rho_{i+1}} + (\omega_3^2 y_i - 2\omega_3 \dot{x}_i) m_i, \\ \dot{V}_{z_i} m_i &= - \left( \frac{3\bar{c}_{20} R_9^2}{2R_i^2} \left( 5 \frac{z_i^2}{R_i^2} - 3 \right) + \frac{5\bar{c}_{40} R_9^4}{16R_i^4} \left( 30 + \left( 63 \frac{z_i^2}{R_i^2} - 70 \right) \frac{z_i^2}{R_i^2} \right) \right) \frac{\mu m_i z_i}{R_i^3} - \\ & \frac{\mu m_i}{R_i^3} z_i - X_i \frac{\dot{z}_i}{|V_i|} + T_i \frac{z_i - z_{i-1}}{\rho_i} - T_{i+1} \frac{z_{i+1} - z_i}{\rho_{i+1}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\omega_3$  - угловая скорость вращения Земли,  
 $R_3$  - большая полуось общего земного эллипсоида,  
 $\bar{c}_{20}, \bar{c}_{40}$  - коэффициенты второй и четвертой зональных гармоник  
разложения в ряд по сферическим функциям потенциала Земли,  
 $x_i, y_i, z_i$  - координаты  $i$ -ой точки во вращающейся прямоугольной  
гринвичской системе координат,  
 $V_{Xi}, V_{Yi}, V_{Zi}$  - проекции вектора скорости точки на эти оси,  
 $\mu$  - гравитационный параметр Земли,  $R_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$ .

Важной особенностью моделирования процесса выпуска троса является то, что во время численного расчета количество точечных масс, посредством которых представлен трос, увеличивается на единицу каждый раз, как только расстояние между КА и ближайшей к нему массой достигает величины  $\rho_1$ . Эта величина подбирается так, чтобы сила натяжения, действующая на первую точечную массу до и после ввода новой точки, не изменялась:

$$\rho_1 = \left( \frac{T_1 - D_1 \dot{\gamma}}{ES_1} + 1 \right) l_1 + \Delta L_0,$$

где  $T_1$  определяется заданным законом управления силой натяжения троса.

С помощью уравнений (3) проведено моделирование выпуска троса для проекта YES-2. В качестве закона управления использовалась заданная заказчиком эксперимента зависимость

$$T_1 = T_{ref} (1 + k_1(L - L_{ref}) + k_2(V_{r1} - V_{ref})),$$

где  $T_{ref}$  - расчетные сила натяжения троса,  
 $L_{ref}$  - длина выпущенного троса,  
 $V_{ref}$  - скорость выпуска,  
 $k_1, k_2$  - управляющие коэффициенты,  
 $L$  - измеренная длина выпущенного троса.

Моделирование проведено при следующих начальных условиях и параметрах:

предельная длина троса –	30 км;
погонная плотность троса–	0.18 кг/км;
масса троса –	5.4 кг;
диаметр троса	0.5 мм;
жесткость троса –	5 кН;
коэффициент потерь –	0.06;
масса КА –	6300кг;
масса груза –	12 кг;
баллистический коэффициент КА –	0.0123 м <sup>2</sup> /кг.

Начальные координаты и скорость КА задавались в гринвичской системе координат  $x_0 = -3724.741$  км,  $y_0 = 5492.645$  км,  $z_0 = 0$ ,

$$V_{X0} = -2503.02 \text{ м/с}, V_{Y0} = -1718.50 \text{ м/с}, V_{Z0} = 6912.06 \text{ м/с}.$$

Груз отделяется от спутника вертикально вниз с начальной относительной скоростью  $V_{r1} = 2.58$  м/с.

На рис. 2 показана траектория движения груза в барицентрической системе  $Atnb$  (ось  $An$  направлена по радиус-вектору КА в сторону его возрастания, ось  $Ab$  нормальна плоскости орбиты, и коллинеарна вектору интеграла площадей, а ось  $At$  дополняет систему до правой) для различного числа используемых при моделировании точечных масс. Результаты моделирования показали, что колебания в плоскости  $Atn$  на три порядка превосходят поперечные колебания в плоскости  $Anb$ . Поэтому при оценочных расчетах, не требующих большой точности, можно считать движение КТС плоским.

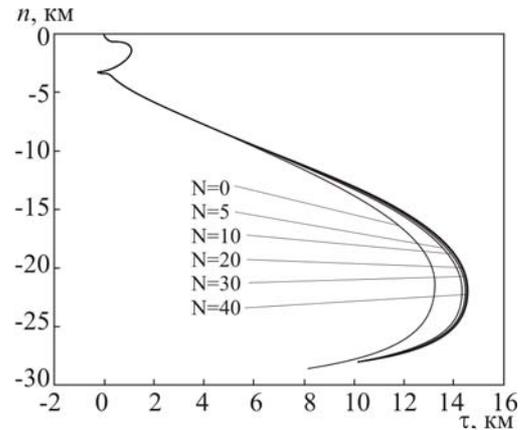


Рисунок 2 - Траектории движения груза в барицентрической системе

Для  $N=40$  отделение груза от троса происходит на высоте 256.83 км при скорости движения  $\sim 7700$  м/с. Круговая скорость на этой высоте равна  $v_l = 7756$  м/с, поэтому груз перейдет на баллистическую траекторию и спустится с орбиты. Использование КТС позволяет снизить скорость движения спускаемой капсулы более чем на  $\sim 50 - 70$  м/с.

Для оценки влияния атмосферы на движение системы был выполнен расчет для случаев учитывающих и не учитывающих влияние атмосферы на трос для  $N=20$ . Расстояние между точками отделения, полученными в результате этих расчетов, составляет 97м, а разница скоростей отделения – 0.5 м/с. Таким образом, учет действующей на трос силы сопротивления атмосферы ощутимо влияет на параметры движения груза в момент отделения от троса.

В четвертой главе исследовано влияние тросовой системы на пространственное движение несущего КА.

Рассмотрим механическую систему, показанную на рис. 3. Она состоит из КА с центром масс в точке  $C$ , невесомого троса  $AB$  и груза  $B$ . Будем считать движение плоским. Динамика центра масс КА описывается известной системой дифференциальных уравнений.

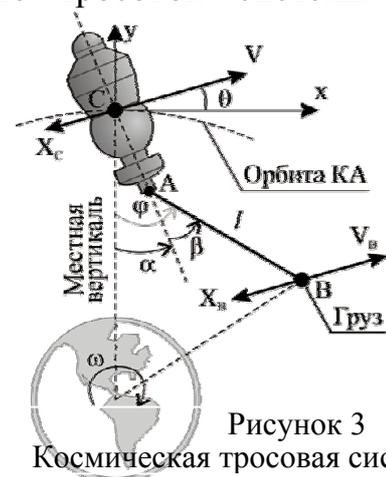


Рисунок 3

Космическая тросовая система

В четвертой главе получены оригинальные дифференциальные уравнения, описывающие движение груза с учетом вращения КА относительно его центра масс.

$$\begin{aligned} \ddot{l} = & -2\omega l \dot{\varphi} - T m_B^{-1} + (X_C m_C^{-1} - X_B m_B^{-1}) \sin(\varphi - \theta) + 3\omega^2 l \cos^2 \varphi + l \dot{\varphi}^2 + \\ & + \Delta (\ddot{\alpha} \sin(\alpha - \varphi) + (\dot{\alpha}^2 - 2\dot{\alpha}\omega) \cos(\alpha - \varphi) + 3\omega^2 \cos \alpha \cos \varphi), \\ \ddot{\varphi} = & 2\omega \dot{l} l^{-1} + l^{-1} (X_C m_C^{-1} - X_B m_B^{-1}) \cos(\varphi - \theta) - 3\omega^2 \cos \varphi \sin \varphi - 2\dot{\varphi} \dot{l} l^{-1} + \\ & + \Delta l^{-1} (-\ddot{\alpha} \cos(\alpha - \varphi) + (\dot{\alpha}^2 - 2\dot{\alpha}\omega) \sin(\alpha - \varphi) - 3\omega^2 \cos \alpha \sin \varphi). \end{aligned}$$

(4)

Здесь  $\alpha$  - угол отклонения оси КА от вертикали,  
 $\theta$  - угол наклона траектории,  
 $\Delta = CA$  - расстояние от центра масс КА до точки крепления троса,  
 $m_B, m_C$  - массы груза, КА,  
 $X_B, X_C$  - действующие на них силы аэродинамического сопротивления.

Для круговой орбиты движение КА относительно центра масс описывается полученным с помощью теоремы об изменении кинетического момента уравнением:

$$\ddot{\alpha} = \Omega^2 \sin(\varphi - \alpha) + \kappa \sin 2\alpha . \quad (5)$$

Здесь  $\Omega^2 = T(t)\Delta / J_Z$ ,

$$\kappa = 3n^2(J_X - J_Y) / (2J_Z),$$

$J_X, J_Y, J_Z$  - главные компоненты тензора инерции спутника,

$$n = \sqrt{\gamma M (R_3 + H)^{-3}},$$

$M$  - масса Земли,

$\gamma$  - универсальная гравитационная постоянная,

$H$  - высота полета КА.

Рассмотрен случай, когда момент силы натяжения троса существенно превышает гравитационный момент ( $\Omega^2 \gg |\kappa|$ ). Введен в рассмотрение вектор  $\mathbf{z}$ , который определяет параметры движения центра масс КА, а также угол отклонения, длину троса и их производные. Предполагается, что компоненты этого вектора меняются медленно ( $\dot{\mathbf{z}} = O(\varepsilon)$ ,  $\varepsilon$  - малый параметр). После замены переменных  $\beta = \varphi - \alpha$  система уравнений, описывающая движение КТС сведена к возмущенной системе с одной быстрой переменной  $\beta$ :

$$\begin{cases} \ddot{\beta} + \Omega^2(\mathbf{z}) \sin(\beta) = \varepsilon \Phi_\beta(\mathbf{z}, \beta), \\ \dot{\mathbf{z}} = \varepsilon \Phi_z(\mathbf{z}), \end{cases} \quad (6)$$

где  $\varepsilon \Phi_\beta(\mathbf{z}, \beta) = \ddot{\varphi} - \kappa(\mathbf{z}) \sin(2\varphi - 2\beta)$ . Уравнения для медленных переменных  $\mathbf{z}$  в системе (6) не содержат  $\beta$  и могут интегрироваться отдельно.

В соответствии с методом Ван-дер-Поля для случая, когда угол  $\beta$  мал, первое уравнение системы (6) заменено на два уравнения первого порядка для переменных амплитуда-фаза  $(\xi, \eta)$ , которые затем усреднены.

$$\begin{cases} \dot{\xi} = -\dot{\Omega}(z) \xi (2\omega(z))^{-1}, \\ \dot{\eta} = \Omega - (2\pi \xi \Omega(z))^{-1} \int_0^{2\pi} \varepsilon \Phi_\beta(z, \xi \cos \eta) \cos \eta d\eta, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\dot{\Omega}(z) = \frac{d\Omega}{dt} = \sum_{z_i} \frac{\partial \Omega}{\partial z_i} \dot{z}_i = \varepsilon \sum_{z_i} \left( \frac{\partial \Omega}{\partial z_i} \Phi_{z_i} \right)$ ,  $\beta = \xi \cos \eta$ ,  $\eta = \Omega t + \eta_0$ .

Усредненные уравнения (7) в своем решении не содержат высокочастотных составляющих, поэтому их численное интегрирование может проводиться с большим шагом.

Для возмущенной системы (7) интеграл действия является адиабатическим инвариантом:

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Omega \xi^2 \sin^2 \eta d\eta = \frac{\Omega(z)\xi^2}{2} = \text{const}. \quad (8)$$

Из выражения (8) в явном виде получена зависимость от времени амплитуды колебаний троса относительно оси КА.

$$\xi(t) = \sqrt{\frac{2I_0}{\Omega(\mathbf{z}(t))}} = \left( \frac{4I_0^2 J_Z}{T(t)\Delta} \right)^{1/4} = \xi_0 \left( \frac{T(t_0)}{T(t)} \right)^{1/4}, \quad (9)$$

где  $I_0 = \sqrt{T_0 \Delta / J_Z} \xi_0^2 / 2$ ,

$\xi_0$  - значение амплитуды угла  $\beta$  в момент  $t = t_0$ .

Для случая, когда сила натяжения троса и угол между линией действия этой силы и вертикалью – медленно меняющиеся функции, а угол  $\beta$  мал, уравнение (4) записано в виде:

$$\ddot{\alpha} + (a(\tau) + 2\kappa)\alpha - b(\tau) = 0, \quad (10)$$

где  $a(\tau) = T(\tau)\Delta J_Z^{-1} \cos \varphi(\tau)$ ,  $b(\tau) = T(\tau)\Delta J_Z^{-1} \sin \varphi(\tau)$ ,  $\tau = \varepsilon t$ .

В диссертации получено порождающее решение для (10):

$$\alpha(t) = b\Omega^{-2} + (\alpha_2 - b\Omega^{-2}) \cos(\Omega t), \quad (11)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $\kappa$  - постоянные величины,

$\alpha_2 = \alpha_{\max}$  - амплитудное значение колебаний по углу  $\alpha$ .

С помощью интеграла действия и решения (11) получено уравнение огибающей кривой угла отклонения КА относительно местной вертикали

$$\alpha_{\max}(\tau) = \frac{I_0 \sqrt{J_Z}}{\sqrt{T(\tau)\Delta \cos \varphi(\tau) + 3n^2(J_X - J_Y)}} + \frac{T(\tau)\Delta \sin \varphi(\tau)}{T(\tau)\Delta \cos \varphi(\tau) + 3n^2(J_X - J_Y)}. \quad (12)$$

В процессе разворачивания тросовой системы на борту КА возникает дополнительное ускорение

$$W = \sqrt{\dot{\alpha}^4 r^2 + \ddot{\alpha}^2 r^2} \approx \xi \Omega^2 r \sqrt{\xi^2 \sin^4 \eta + \cos^2 \eta} + O(\varepsilon), \quad (13)$$

где  $r$  - расстояние от центра масс КА до точки, в которой определяются дополнительные ускорения.

Если угол  $\beta$  мал и  $\xi \leq 1$ , то максимум функции  $f(\eta) = \sqrt{\xi^2 \sin^4 \eta + \cos^2 \eta}$  равен единице. С помощью решения (9) записана приближенная аналитическую зависимость для максимальной дополнительной перегрузки, вызванной разворачиванием тросовой системы:

$$W_{\max}(t) = \xi_0 \Delta r J_Z^{-1/4} \sqrt{T(t)^3 T_0}. \quad (14)$$

Формула (14) дает оценку максимальному дополнительному ускорению, при этом не требуется проведения численного интегрирования исходной (6) или укороченной (7) системы уравнений.

Если колебания КА описываются уравнением (10), то в точках траектории, соответствующих экстремальным значениям угла  $\alpha$ , его производная по времени равна нулю и оценка полного ускорения имеет вид

$$\langle W \rangle = \langle W_\tau \rangle = \langle \ddot{\alpha} r \rangle = r(b(\tau) - (a(\tau) + 2\kappa)\alpha_{\max}(\tau)), \quad (15)$$

С помощью системы (6) проведено моделирование движения КТС с указанными выше параметрами. Процесс развертывания тросовой системы условно разделен на три участка (рис. 4). На участке I сила натяжения, а значит и частота  $\omega$ , невелика. Значительное влияние на движение КА оказывает гравитационный момент. На участке II влияние гравитационного момента невелико по сравнению с влиянием восстанавливающего момента от силы натяжения троса, однако, оно все еще не позволяет применять приближенное аналитическое решение (9), поскольку не выполняется условие  $\Omega^2 \gg |\kappa|$ . На участке III восстанавливающий момент является преобладающим по сравнению с другими факторами.

Для оценки амплитуды колебания КА (рис. 4) и дополнительного ускорения (рис.5) можно пользоваться приближенными формулами (9) и (14).

Если на борту КА действует двигательная установка, создающая момент  $M_{дв}$ , то в правой части уравнения (5) добавляется слагаемое  $M_{дв} J_Z^{-1}$ .

На рис. 6 приведены закон отклонения троса от вертикали  $\varphi(t)$  и зависимости угла отклонения спутника от вертикали с учетом работы системы ориентации  $\alpha_{дв}(t)$  и без нее  $\alpha(t)$ .

**Пятая глава** посвящена анализу различных нештатных ситуаций, которые могут возникнуть при развертывании КТС. Показано, что отклонение от требуемой ориентации КА в момент отделения груза может

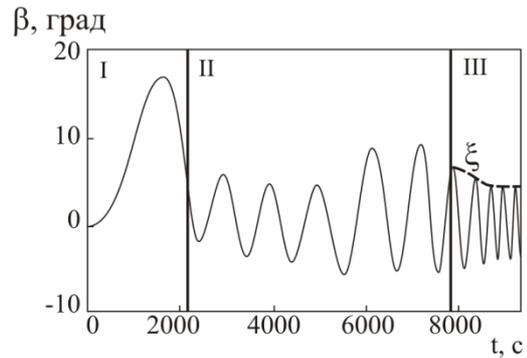


Рисунок 4 – Зависимость угла  $\beta$  и амплитуды  $\xi$  от времени

Рисунок 5 - Полное ускорение  $W$

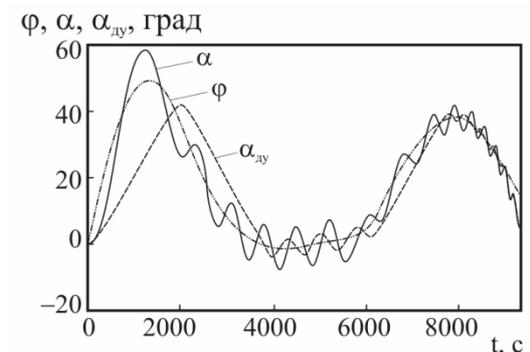
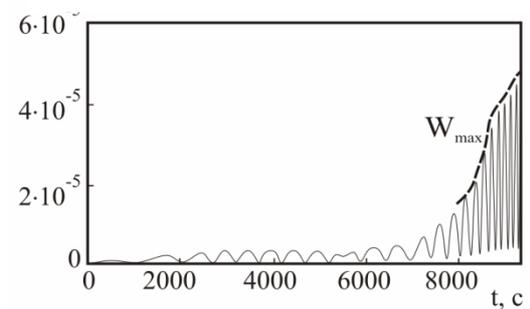


Рисунок 6 - Углы отклонения троса  $\varphi(t)$  и спутника от вертикали  $\alpha(t)$ ,  $\alpha_{дв}(t)$

привести к тому, что груз перейдет на более высокую по сравнению с КА орбиту, столкнется с ним, или произойдет наматывание троса на КА.

В результате серии численных экспериментов в пространстве углов, задающих направление относительной скорости груза (рис. 7), были построены зоны соответствующие вышеуказанным нештатным ситуациям и зона безопасного отделения (рис. 8).

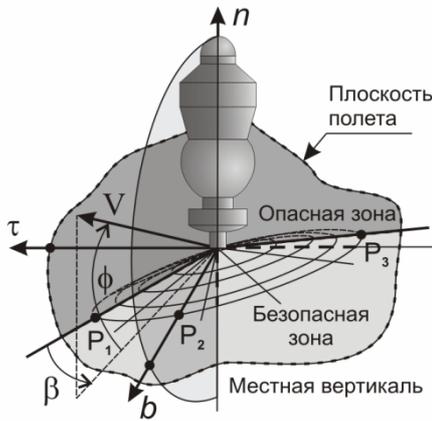


Рисунок 7 – Зоны отделения



Рисунок 8 - Опасные зоны отделения и соответствующие им нештатные ситуации. А – груз переходит на более высокую орбиту, В – наматывание троса на КА

В результате проведения ряда численных экспериментов выявлено, что боковое отклонение при отделении оказывает слабое влияние на заключительный этап движения. Траектории, полученные при углах  $\beta=0$  и  $\beta=\pi$ , образуют на плоскости  $A\tau n$  область, куда попадают все другие траектории (рис. 9).

Для нештатной ситуации заклинивания троса серия численных расчетов показала, что заклинивание особенно опасно на начальном этапе развертывания, когда груз находится около КА, и наматывание троса происходит независимо от его ориентации.

Для спутника с системой управления движением, позволяющей ориентировать его по местной вертикали, показано, что ее отказ после начала развертывания троса влияет только на уровень микрогравитации на борту спутника и не приводит к столкновению КА со спускаемым грузом и/или наматыванию троса на спутник. Если существует вероятность отказа системы ориентации, то с точки зрения обеспечения минимальных дополнительных микроускорений на борту КА, лучше вообще ее не использовать, позволив КА совершать свободные колебания.

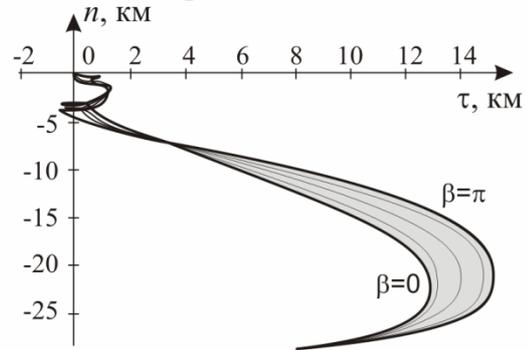


Рисунок 9 - Траектории движения груза при первом способе развертывания для различных углов  $\beta$  и  $\phi = -\pi / 3$

## Основные результаты работы

В результате проведенных в работе исследований решена актуальная научно-техническая задача создания моделей динамики космической тросовой системы по доставке полезной нагрузки с орбиты на Землю на всех этапах её жизненного цикла, включая влияние нештатных ситуаций при разворачивании.

Получены следующие основные научные и практические результаты, позволяющие вести качественный и количественный анализ процесса спуска полезной нагрузки с орбиты на Землю:

1. Построена пространственная дискретная модель КТС с весомым, гибким, вязкоупругим тросом переменной длины, учитывающая влияние атмосферы на трос.
2. Разработана математическая модель, описывающая плоское движение КА относительно центра масс в процессе разворачивания тросовой системы.
3. Получены приближенные аналитические решения, описывающие изменение амплитуды колебаний КА, вызванное изменением величины и направления силы натяжения троса.
4. Получена приближенная аналитическая зависимость, позволяющая оценить уровень микроускорений, возникающих на борту КА в процессе разворачивания троса.
5. Разработаны модели потенциально возможных нештатных ситуаций, связанных с отказами в системе управления движением КА и в механизме разворачивания троса.

Результаты, полученные автором, нашли реализацию в рамках российско-европейского проекта YES-2, который был выполнен в качестве попутного эксперимента на КА "Фотон-М" №3 в 2007г., главным конструктором которого является, в том числе автор.

## Основные публикации по теме диссертации

### В рецензируемых журналах

1. В.С. Асланов, А.С. Ледков, Н.Р. Стратилатов.  
*Пространственное движение космической тросовой системы, предназначенной для доставки груза на Землю* // *Общероссийский научно-технический журнал "Полет"*. – 2007. - №2. – С. 28-33.
2. В.С. Асланов, Н.Р. Стратилатов.  
*Уравнения движения орбитальной тросовой системы с учетом колебаний космического аппарата* // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва*. - 2008. - №1. - С.16-22.
3. В.С. Асланов, Н.Р. Стратилатов.  
*Малые колебания осесимметричного космического аппарата с тросовой системой*// *Вестник Самарского государственного университета – Естественнонаучная серия. Механика*. - 2008. - №6. - С.202-208.
4. В.С. Асланов, А.С. Ледков, Н.Р. Стратилатов.  
*Влияние тросовой системы, предназначенной для доставки груза на Землю, на вращательное движение космического аппарата*// *Общероссийский научно-технический журнал "Полет"*.-2009.-№1. - С.54-60.

### В других изданиях

5. Р.Н. Ахметов, Н.Р. Стратилатов и др.  
*Исходные данные на разработку КА "Фотон-М" N2, N3, N353П-34КС-27972-1111*. – Самара: ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ-Прогресс", 2003. - 168 с.
6. В.С. Асланов, Н.Р. Стратилатов.  
*Анализ движения космического аппарата с тросовой системой с учетом работы двигателей ориентации* // *Сборник трудов XIII Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов*. Самара.-2007. - С.48-53.
7. Н.Р. Стратилатов, А.В. Чечин и др.  
*Инженерная записка TN2 "Описание эксперимента YES2"*. – Самара: ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ-Прогресс", 2006. - 16 с.
8. Н.Р. Стратилатов, А.В. Чечин и др.  
*Инженерная записка TN5 "Проведение эксперимента YES2"*. – Самара: ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ-Прогресс", 2006. - 73 с.
9. Р.Н. Ахметов, Н.Р. Стратилатов и др.  
*Космический комплекс "Фотон-М" N:3. Отчет по результатам летных испытаний КА "Фотон-М" N 353П-34КС-32335-1103*. – Самара: ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ-Прогресс", 2007. - 157 с.