

На правах рукописи

НИКОНОВА ИРИНА АНАТОЛЬЕВНА

**Статистический анализ движения
неуправляемых лёгких спускаемых аппаратов**

Специальность 05.07.09 – Динамика, баллистика,
управление движением летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара - 2010

Работа выполнена на кафедре динамики полёта и систем управления государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Заболотнов Юрий Михайлович.

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор
Горелов Юрий Николаевич,

доктор технических наук, профессор
Тимбай Иван Александрович.

Ведущая организация – Федеральное государственное унитарное предприятие "Государственный научно-производственный ракетно-космический центр "ЦСКБ-Прогресс" (г. Самара).

Защита состоится 27 декабря 2010 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.04 при государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)» по адресу: 443086 г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)».

Автореферат разослан

25 ноября 2010 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Прохоров А. Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. При освоении космоса возрастает важность доставки на Землю результатов научно-прикладных исследований и экспериментов. В беспилотном варианте основным средством доставки грузов с орбиты остаются неуправляемые спускаемые аппараты (СА). В последнее время начали использоваться лёгкие СА или спускаемые капсулы (СК) для доставки с орбиты небольших полезных грузов (вес менее 15 кг). Примером такого использования может служить эксперимент YES2 (Young Engineers' Satellite), в котором на космическом аппарате (КА) «Фотон М3» была реализована новая технология возвращения из космоса полезного груза с помощью тросовой системы (сентябрь 2007 года).

При проектировании и эксплуатации неуправляемых СА, совершающих снижение в атмосфере, необходимо учитывать большую степень неопределённости при расчёте контролируемых характеристик их движения. К основным контролируемым характеристикам движения СА в атмосфере обычно относят угол атаки и модуль угловой скорости в характерных точках траектории спуска, рассеивание точки посадки, измеряемое стандартными отклонениями продольной и боковой дальности полёта, и др. Возникающая неопределённость в значениях контролируемых характеристик движения вызвана, например, неточностью знания внешних условий движения в атмосфере (плотности атмосферы, характеристик ветра и др.), неточностью знания начальных условий движения СА и т. д. Указанные возмущения имеют объективный характер и приводят к тому, что заданные условия движения СА в атмосфере могут быть обеспечены лишь с определённой долей вероятности. Причём влияние случайных возмущений на контролируемые характеристики движения усиливается при малой массе СА.

Несмотря на большое количество работ, связанных с моделированием и анализом движения неуправляемых спускаемых аппаратов в атмосфере, таких авторов, как Ярошевский В. А., Шилов А. А., Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н., Асланов В. С., Заболотнов Ю. М., Тимбай И. А., Любимов В. В. и др., в них рассматриваются только отдельные аспекты статистического анализа движения относительно центра масс. Например, оценивается вероятность зависания спускаемого аппарата донной частью вперёд в направлении набегающего воздушного потока или производится оценка вероятности захвата в устойчивый резонансный режим по начальным условиям движения. Эти частные задачи решаются при неполном наборе возмущений.

Поэтому разработка методов статистического моделирования и анализа движения лёгких СА в атмосфере с учётом достаточно полного набора известных возмущений и выбор на этой основе параметров СА и характеристик их отделения от КА или от тросовой системы (ТС), обеспечивающих заданные условия движения, является актуальной задачей.

Объектом исследования является лёгкий спускаемый аппарат (спускаемая капсула), совершающий снижение в атмосфере Земли.

Предметом исследования являются методы и модели, используемые для статистического анализа движения спускаемого аппарата в атмосфере.

Целью работы является разработка статистической математической модели движения СА, методов её анализа и определение на этой основе параметров СА и условий его отделения от КА или от тросовой системы, повышающих безопасность доставки полезного груза на поверхность Земли.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель для статистического расчёта основных контролируемых характеристик движения СА с учётом достаточно полного набора известных возмущений.
2. Оценить законы распределения контролируемых характеристик движения в характерных точках траектории спуска и их эволюцию при изменении параметров СА и условий его отделения от КА или от тросовой системы.
3. Разработать метод оценки значимости возмущений для построенной статистической математической модели движения.
4. Исследовать влияние асимметрии СА на законы распределения контролируемых характеристик для атмосферного участка спуска.
5. Провести сравнительный статистический анализ движения лёгких СА и СА традиционного типа.
6. Исследовать возможность управления законами распределения контролируемых характеристик движения СА с целью повышения безопасности доставки полезного груза на Землю.
7. Разработать универсальную автоматизированную информационную систему статистического моделирования и анализа неуправляемого движения СА в атмосфере.

Методы исследования. Решение перечисленных задач основано на использовании методов теории вероятностей, случайных процессов и математической статистики, фундаментальных положений механики, математики и численного анализа.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Получены законы распределения контролируемых характеристик движения СА вокруг центра масс в момент входа в плотные слои атмосферы (условная граница атмосферы 110 км) и в характерных точках атмосферного участка спуска.
2. Исследовано влияние на полученные законы распределения параметров СА и условий их отделения от базового КА или от тросовой системы.
3. Проведён сравнительный анализ различных методов оценки значимости возмущений для рассматриваемых контролируемых характеристик при статистическом моделировании движения неуправляемых СА.
4. Проведено статистическое исследование новой схемы спуска на Землю лёгких СА, возвращаемых с орбиты с помощью тросовой системы.

Практическая значимость и внедрение результатов. Практическое значение работы состоит в том, что основные результаты статистических

исследований движения лёгких СА доведены до конкретных аналитических оценок, выводов и рекомендаций.

Разработанные математическая модель и методы статистического расчёта реализованы в виде комплекса программ и составляют основу автоматизированной информационной системы статистического моделирования и анализа неуправляемого движения СА в атмосфере.

Результаты исследования использованы для независимой оценки альтернативных схем спуска с орбиты лёгкой капсулы при осуществлении эксперимента с тросовой системой, проведённого Европейским космическим агентством совместно с ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (г. Самара).

Результаты исследований внедрены в учебный процесс СГАУ.

Апробация результатов исследования.

Основные теоретические и практические положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах: Всероссийская конференция молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, 2008 г.; Международная конференция «Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках», г. Самара, 2008 г.; Актуальные проблемы современной науки: 3-й Международный форум (8-я Международная конференция молодых учёных и студентов), г. Самара, 2007 г.; 13-й Всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов, г. Самара, 2007 г.; 3-я Всероссийская научная конференция «Математическое моделирование и краевые задачи», г. Самара, 2006 г.; Научно-техническая конференция с международным участием «Перспективные информационные технологии в научных исследованиях, проектировании и обучении (ПИТ-2006)», г. Самара, 2006 г.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 11 печатных работах, в том числе две в журналах, определённых Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации.

Структура и объём работы.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Объём диссертации составляет 175 страниц машинописного текста.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ:

1. Математическая модель статистического расчёта основных контролируемых характеристик движения лёгких СА с учётом многих случайных возмущений.
2. Результаты статистического анализа движения СА на внеатмосферном участке для различных схем спуска.
3. Результаты статистического анализа движения относительно центра масс в атмосфере для лёгких СА и для СА традиционного типа.
4. Результаты сравнительного статистического анализа движения лёгких СА и СА традиционного типа.
5. Методы оценки значимости возмущений в задаче статистического анализа движения СА.

6. Универсальная автоматизированная информационная система статистического моделирования и анализа неуправляемого движения СА.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследования, определяются объект и предмет исследования, формулируется цель работы и характеризуются основные методы исследования, научная новизна и практическая значимость, описывается структура работы.

В первой главе представлен аналитический обзор существующих работ по теме диссертации. Особое внимание уделяется статистическим методам моделирования, математическим моделям движения СА, методам анализа движения СА и оценке значимости возмущений.

Анализ работ, относящихся к исследованию вопросов статистического анализа движения СА, показывает, что все они рассматривают только отдельные аспекты вероятностного анализа движения и учитывают лишь отдельные группы случайных возмущений. Поэтому важным является проведение наиболее полного комплексного, системного статистического анализа движения СА в атмосфере, наиболее близкого к реальным условиям проектирования, изготовления и эксплуатации неуправляемых СА различных типов и назначения.

Так как основным методом оценки вероятностных характеристик и распределений при статистическом анализе движения СА является метод статистических испытаний, то наиболее рационально по его результатам одновременно оценивать и значимость действующих возмущений. Оценка значимости возмущений является важной задачей, так как достоверное её решение позволяет определить направления совершенствования баллистического проектирования СА и, в конечном счёте, повысить безопасность доставки полезного груза с орбиты на Землю.

Оценка значимости возмущений получается на основании построения приближённых аналитических зависимостей контролируемых характеристик движения от входных случайных величин. Для оценивания значимости действующих возмущений были применены метод наименьших квадратов и метод статистической линеаризации, реализуемые в итерационных алгоритмах и позволяющие производить оценку значимости различных возмущений по результатам проведения статистических испытаний.

Выделяется класс лёгких СА малой массы (менее 15 кг) с баллистическим параметром $K = \frac{S}{m} \approx 0,01 \text{ м}^2/\text{кг}$ (S - характерная площадь, m - масса СА) и более, что приблизительно на порядок больше, чем для СА традиционного типа.

На основании проведённого аналитического обзора сформулированы основные задачи и разработана схема исследований (рисунок 1).

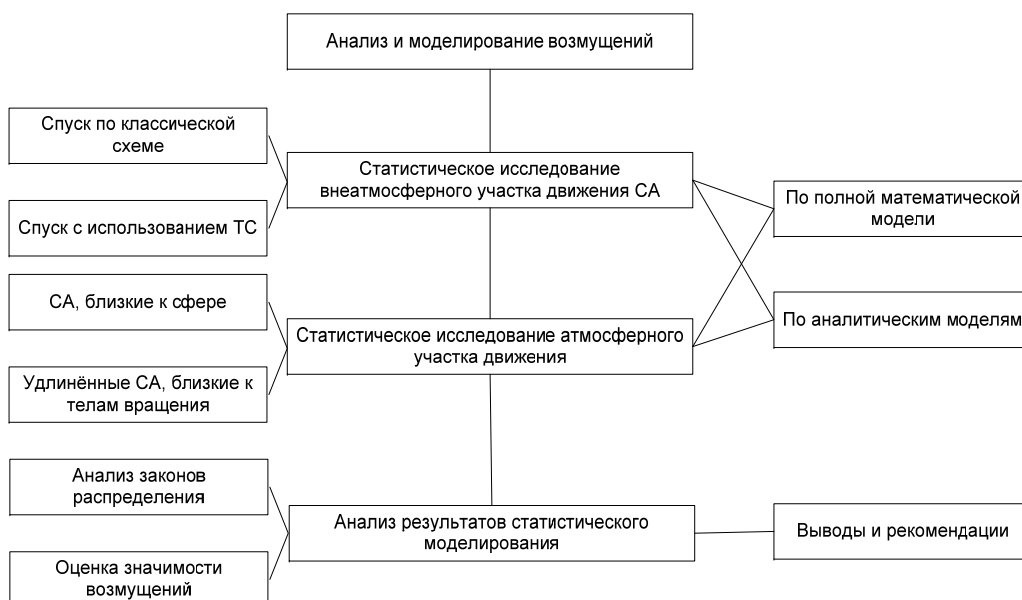


Рисунок 1 – Схема исследований

Во второй главе представлено описание и проводится анализ случайных возмущений, действующих на СА в процессе движения. Вся совокупность случайных возмущений разбивается на следующие группы: 1) возмущения, связанные с начальными условиями движения; 2) возмущения среды (плотности атмосферы, характеристик ветра и т. д.); 3) неточность знания аэродинамических характеристик аппарата; 4) возмущения, связанные с малой геометрической и массово-инерционной асимметриями СА.

Для компонентов начальных угловых скоростей СА (не имеющих начальную закрутку вокруг своей продольной оси) в связанной системе координат при отделении принимался нормальный закон распределения с нулевым математическим ожиданием.

При моделировании разброса коэффициентов аэродинамических сил принимался нормальный закон распределения, причём для статических аэродинамических характеристик величина стандартного отклонения равна 5...7% от номинального значения. В этом случае коэффициенты аэродинамических моментов вычисляются через коэффициенты аэродинамических сил. Считается, что погрешность определения коэффициентов демпфирующих моментов существенно больше, и для них величина стандартного отклонения составляет приблизительно 20...30% от номинала.

Значения средней плотности верхней атмосферы Земли и её предельные отклонения в диапазоне высот от 120 до 300 км соответствуют ГОСТ 25645.101–83 «Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для проектных баллистических расчётов искусственных спутников Земли». Для высот менее 120 км плотность атмосферы рассчитывается по ГОСТ Р 25645.166–2004. Так как в ГОСТ Р 25645.166–2004 не указаны относительные отклонения плотности атмосферы, было принято предположение о нормальном законе распределения плотности вероятности в силу того, что разброс значений данной физической величины обусловлен многими причинами. Отклонения плотности атмосферы 3σ (три средних квадратических отклонения (СКО)) задавались из расчёта 20% от номинальной плотности.

Для лёгких СА важным представляется учёт характеристик ветра. Закономерности вертикального распределения характеристик ветра по широтному поясу северного полушария для высот до 30 км устанавливаются ГОСТ 24728–81 «Ветер. Пространственное и временное распределение характеристик». Распределение по высоте средних значений зональной и меридиональной составляющих скорости ветра для высот от 30 до 70 км, а также их стандартных отклонений для высот от 0 до 70 км соответствует данным, полученным Школьным Е. П. и Майбородой Л. А. в ходе их исследований статистических характеристик ветра.

Для обоснования алгоритма генерации случайных возмущений при статистическом моделировании значений массово-инерционной асимметрии был проведён предварительный модельный численный эксперимент. Он заключался в определении законов распределения основных массово-инерционных характеристик твёрдого тела в некоторой связанной системе координат при установке нескольких балансировочных грузов. В результате было выяснено, что коэффициенты корреляции между рассматриваемыми массово-инерционными характеристиками тела близки к нулю (порядка 10^{-6}), а законы их распределения близки к нормальному закону.

Для анализа движения относительно центра масс лёгкого СА, возвращаемого с помощью ТС, были получены аналитические зависимости, позволяющие связать начальную ориентацию и угловые скорости СА при отделении от ТС со значениями этих же величин на условной границе атмосферы и предназначенные для приближённого статистического анализа движения лёгкого СА на внеатмосферном участке его полёта.

В третьей главе описывается основная математическая модель и проводится статистический анализ движения относительно центра масс СА традиционного типа на внеатмосферном и атмосферном участках спуска. Подробный статистический анализ движения относительно центра масс для СА традиционного типа до настоящего времени не проводился. Этот анализ также необходим для последующего сравнения с результатами статистического анализа движения лёгких СА.

Движение СА описывается в геоцентрической неподвижной системе координат следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{r}}{dt} &= \bar{V}^a, & \frac{d\bar{V}^a}{dt} &= \frac{\bar{R}_A}{m} + \bar{g}, & \frac{d\bar{K}}{dt} + \bar{\omega} \times \bar{K} &= \bar{M}_0, \\ \frac{d\bar{l}}{dt} &= \bar{l} \times \bar{\omega}, & \frac{d\bar{m}}{dt} &= \bar{m} \times \bar{\omega}, & \frac{d\bar{n}}{dt} &= \bar{n} \times \bar{\omega}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \bar{r} и \bar{V}^a - радиус-вектор и вектор абсолютной скорости центра масс СА, \bar{g} - вектор гравитационного ускорения, \bar{R}_A - аэродинамическая сила, m - масса, $\bar{K} = [J]\bar{\omega}$ - вектор кинетического момента, $[J]$ - тензор инерции, $\bar{\omega}$ - вектор угловой скорости СА; $\bar{l}, \bar{m}, \bar{n}$ - орты связанной системы координат.

Система (1) не имеет особенностей по пространственному углу атаки и может быть использована для расчёта движения на внеатмосферном и атмосферном участках полёта СА с произвольным внутренним распределением

масс и с достаточно сложной геометрической формой (при наличии соответствующих аэродинамических характеристик).

Компоненты вектора аэродинамического момента \bar{M}_0 задаются в системе координат, связанной с пространственным углом атаки α , в виде

$$\begin{aligned} M_x &= [m_x + (C_{yn}\Delta\bar{z}_n - C_{zn}\Delta\bar{y}_n) + \Delta m_x] qSl + M_{xd}, \\ M_{yn} &= [m_{yn} + (C_{zn}\Delta\bar{x} - C_x\Delta\bar{z}_n) + \Delta m_{yn}] qSl + M_{yd}, \\ M_{zn} &= [m_{zn} + (C_x\Delta\bar{y}_n - C_{yn}\Delta\bar{x}) + \Delta m_{zn}] qSl + M_{zd}. \end{aligned} \quad (2)$$

где m_x , m_{yn} , m_{zn} - коэффициенты статических моментов относительно точки приведения аэродинамических сил, C_x , C_{yn} , C_{zn} - коэффициенты аэродинамических сил, q - скоростной напор, S и l - характерные площадь и размер, M_{xd} , M_{yd} , M_{zd} - компоненты демпфирующих моментов, $\Delta\bar{y}_n = \Delta\bar{y} \cos \varphi_n - \Delta\bar{z} \sin \varphi_n$, $\Delta\bar{z}_n = \Delta\bar{z} \cos \varphi_n + \Delta\bar{y} \sin \varphi_n$, φ_n - угол собственного вращения, $\Delta\bar{x} = \Delta x/l$, $\Delta\bar{y} = \Delta y/l$, $\Delta\bar{z} = \Delta z/l$ - координаты центра масс относительно точки приведения аэродинамических сил, $\Delta m_{yn} = \Delta m_y \cos \varphi_n - \Delta m_z \sin \varphi_n$, $\Delta m_{zn} = \Delta m_z \cos \varphi_n + \Delta m_y \sin \varphi_n$.

Здесь величины $\Delta\bar{y}$, $\Delta\bar{z}$ характеризуют статическую асимметрию, а моменты Δm_x , Δm_y , Δm_z - аэродинамическую асимметрию СА. Динамическая асимметрия характеризуется величинами J_{xy}/J , J_{xz}/J , J_{yz}/J , $(J_z - J_y)/J$, где $J = (J_x + J_y)/2$, J_{xy} , J_{xz} , J_{yz} и J_x , J_y , J_z - центробежные и осевые моменты инерции СА. Для статически и динамически симметричных тел вращения $m_x = m_{yn} = C_{zn} = \Delta y = \Delta z = \Delta m_x = \Delta m_y = \Delta m_z = J_{xy} = J_{xz} = J_{yz} = \Delta J = 0$.

Статистический анализ контролируемых характеристик движения СА относительно центра масс проводится в нескольких характерных точках траектории спуска: в моменты входа в плотные слои атмосферы (высота 110 км), прохождения максимальных теплового потока и скоростного напора, ввода парашютной системы (высота 8 км). В качестве контролируемых характеристик движения используются: пространственный угол атаки и модуль угловой скорости СА.

Результаты статистического анализа движения СА на внеатмосферном участке полёта показывают, что закон распределения пространственного угла атаки на условной границе атмосферы (110 км) близок к распределению Симпсона (треугольное распределение). При увеличении номинальной угловой скорости закрутки СА вокруг своей продольной оси ω_{x0} треугольное распределение эволюционирует к распределению Лапласа. При изменении угла поворота $\Delta\vartheta$ вектора скорости на внеатмосферном участке полёта указанные выше законы распределения угла атаки СА практически сохраняют свой вид, изменяется лишь положение максимума функции плотности вероятности, которое однозначно определяется величиной угла $\Delta\vartheta$. Получены также приближённые оценки плотности вероятности для угла атаки на границе атмосферы (в виде квадратуры). На рисунке 2 в качестве примера показана гистограмма распределения угла атаки α на границе атмосферы (10000 испытаний,

номинальная закрутка вокруг продольной оси СА $\omega_{x_0} = 0,5c^{-1}$) с наложенной на неё плотностью распределения Лапласа (пунктирная линия) и плотностью распределения, определённой квадратурой (сплошная линия). Сравнение результатов показывает близость полученных оценок к результатам статистических испытаний. Приведённый статистический анализ углового движения на внеатмосферном участке был проведён для случая, когда в начальный момент при отделении от КА продольная ось СА была совмещена (в номинальном положении) с вектором скорости его центра масс.

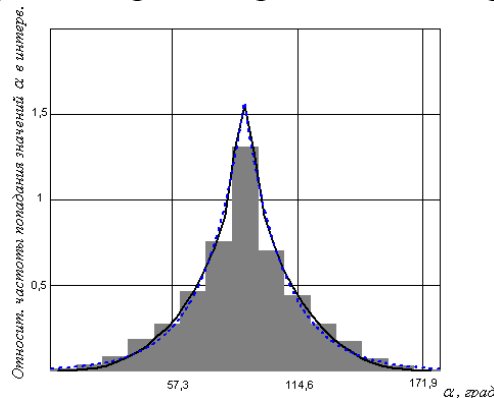


Рисунок 2 - Гистограмма распределения угла атаки СА на условной границе атмосферы (110 км)

Результаты статистического анализа движения СА на атмосферном участке полёта показывают, что законы распределения пространственного угла атаки и модуля угловой скорости в других характерных точках траектории спуска наиболее близки к законам распределения Эрланга и Релея.

Значимость возмущений определялась методами наименьших квадратов и статистической линеаризации (по результатам одной выборки), а также методом статистических испытаний (по результатам нескольких независимых выборок по каждой родственной группе возмущений). Вклад каждой группы возмущений определялся долей в полной дисперсии соответствующей контролируемой характеристики движения. В задаче статистического анализа движения СА относительно центра масс к непротиворечивым оценкам приводит только метод статистических испытаний.

Гистограмма распределения угла атаки для СА традиционного типа, близкого к сфере (масса 180 кг, радиус 0,35 м, номинальное смещение центра масс составляло 0,02 от его диаметра), в момент прохождения максимального скоростного напора представлена на рисунке 3.

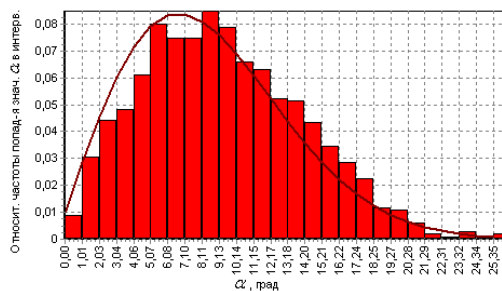


Рисунок 3 - Гистограмма распределения угла атаки СА традиционного типа сферической формы в момент прохождения максимального скоростного напора с наложенным на неё законом распределения Релея

Наибольший вклад в полную дисперсию контролируемых характеристик вращательного движения СА вносят такие факторы, как начальные угловые скорости вращения и начальная ориентация СА в момент отделения от базового КА. Например, для угла атаки в момент прохождения максимального скоростного напора: вклад начальных угловых скоростей вращения составляет 0,6 (СКО $\sigma_{\omega} = 0,001c^{-1}$), а вклад неопределённости в начальной ориентации СА соответствует значению 0,38.

С точки зрения математического моделирования можно условно ввести понятие простой и сложной асимметрии СА. Под простой асимметрией понимается случай, когда имеет место асимметрия какого-либо одного вида: статическая, динамическая или аэродинамическая. Соответственно, под сложной асимметрией понимается случай, когда присутствует асимметрия двух или трёх видов одновременно. При наличии простых видов асимметрии законы распределения основных контролируемых характеристик движения СА относительно центра масс при спуске в атмосфере практически не изменяются.

При увеличении уровня сложной асимметрии плотность распределения контролируемых характеристик движения эволюционирует к двухмодальному закону распределения (рисунок 4), причём вероятность потери устойчивости движения относительно центра масс СА приближается к 0,5. Последнее обстоятельство согласуется с известными оценками вероятности захвата в устойчивый резонансный режим движения СА со сложной асимметрией («Космические исследования», Т. 40, Вып. 5, 2002 г.).

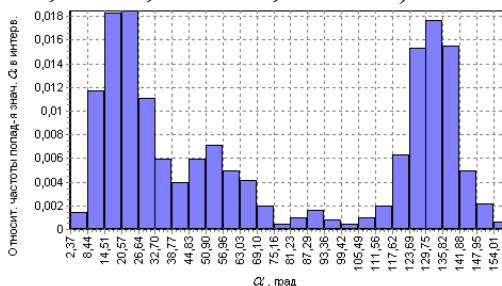


Рисунок 4 – Гистограмма распределения угла атаки СА традиционного типа с вытянутым эллипсоидом инерции в момент прохождения максимального теплового потока для случая большой сложной асимметрии

В четвёртой главе проводится статистический анализ движения лёгкого СА, возвращаемого с орбиты с помощью орбитальной тросовой системы.

Моделирование осуществляется с момента обрезания троса при прохождении СА с тросом местной вертикали с высоты, соответствующей моменту

его отделения (270 км). В этой главе подробно учитываются особенности рассматриваемой схемы возвращения полезных грузов на Землю. Особое внимание уделяется вопросам рассеивания траекторий спуска (точек приземления), которые являются новыми вследствие использования новой технологии возвращения грузов из космоса.

Сначала проводится статистический анализ движения лёгкого СА относительно центра масс для определения законов распределения угла атаки α в момент входа в атмосферу (высота 110 км). Такой анализ даёт возможность целенаправленно изменять условия отделения аппарата, возвращаемого с помощью тросовой системы, с целью обеспечения благоприятных условий его входа в атмосферу. В отличие от предыдущего случая (3 глава), продольная ось СА в номинальном положении составляет угол 90 градусов с вектором скорости его центра масс. Показывается, что данная схема спуска позволяет обеспечить закон распределения угла атаки в момент входа в атмосферу, имеющий максимум вблизи нуля. Ещё больший эффект наблюдается при небольшой закрутке СА вокруг своей продольной оси ($\omega_{x0} = 0,1 \dots 0,5 c^{-1}$).

В отличие от третьей главы, к случайным возмущениям добавляется ошибка угла отклонения троса от вертикали ($\Delta\theta$) в момент обрезания троса.

Результаты статистического анализа движения лёгких симметричных и с простой асимметрией СА относительно центра масс в плотных слоях атмосферы оказались схожими с результатами анализа движения обычных СА (3 глава) в том смысле, что законы распределения угла атаки и модуля угловой скорости близки к законам распределения Эрланга и Релея.

Однако статистический анализ движения относительно центра масс лёгких СА со сложной асимметрией показал другие результаты. Те же самые эволюционные эффекты в изменениях законов распределения при увеличении уровня относительных асимметрий наступали значительно раньше. Кроме того, при статистическом моделировании движения асимметричных лёгких СА удалось установить конечный финальный закон распределения угла атаки в плотных слоях атмосферы при увеличении уровня асимметрии. Оказалось, что при увеличении асимметрии моды двухмодального закона (рисунок 4) сближаются и получается нормальный закон распределения с математическим ожиданием угла атаки, равным 90 градусам. Последнее обстоятельство согласуется с известными результатами исследования движения асимметричных аппаратов в атмосфере, из которых следует существование устойчивой особой точки по углу атаки при значении 90 градусов («Космические исследования», Т. 41, Вып. 5, 2003 г.).

Статистический анализ рассеивания точек приземления лёгких СА, возвращаемых с помощью тросовой системы, показал, что закон распределения продольной и боковой дальностей по рассмотренным возмущениям близок к нормальному закону. Была проведена оценка вклада в полную дисперсию рассеивания точек посадки отдельных возмущений. Оказалось, что основной вклад в полную дисперсию вносят такие факторы, как плотность атмосферы и коэффициенты аэродинамических сил, при достаточно точной работе системы управления движением тросовой системы. Для оценки вклада в полную

дисперсию отдельных возмущений наиболее эффективным является итерационный метод наименьших квадратов (МНК). МНК позволяет сократить количество статистических экспериментов при определении значимости возмущений в 5...6 раз по сравнению с применением метода статистических испытаний по каждой группе возмущений в отдельности. Метод статистической линеаризации при этом показал очень низкую сходимость и поэтому оказался неэффективным.

С помощью МНК была решена важная задача оценки допустимой величины ошибки угла отклонения троса от вертикали $\Delta\theta$ по положению СА в момент обрезания троса, то есть фактически определялись требования по точности работы системы управления развёртыванием тросовой системы. На рисунке 5 показана зависимость СКО продольной дальности полёта лёгкого СА от величины $\Delta\theta$.

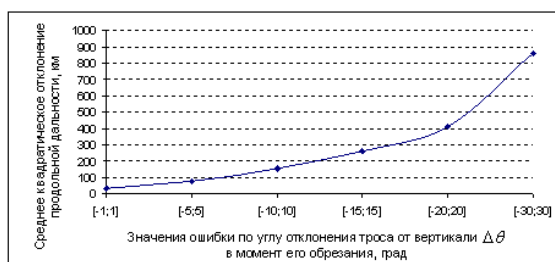


Рисунок 5 – Зависимость среднего квадратического отклонения продольной дальности полёта СА от значений ошибки $\Delta\theta$.

Видно, что ошибка $\Delta\theta$ оказывает значительное влияние на разброс точек посадки СА. Было установлено, что если ошибка для угла отклонения троса от вертикали не превышает одного градуса, то это практически не сказывается на полной дисперсии дальностей полёта (СКО продольной дальности полёта составляет 33 км, СКО боковой дальности полёта составляет 7 км).

С помощью рассмотренных методов был также оценён вклад ветра в полную дисперсию для дальностей спуска лёгких СА. Наибольшее влияние (в долях от полной дисперсии) ветер оказывает на дисперсию боковой дальности полёта. С уменьшением массы СА эллипс рассеивания точек посадки расширяется. Например, при массе СА 10 кг эллипс рассеивания расширяется в 2,5 раза по сравнению с эллипсом рассеивания для СА традиционного типа (180 кг).

В пятой главе описывается автоматизированная информационная система (АИС) статистического моделирования и анализа неуправляемого движения СА в атмосфере.

При проектировании АИС была разработана информационно-логическая модель по методологии объектно-ориентированного проектирования с использованием языка UML. Концептуальная модель базы данных (ER-модель) была построена по методологии IDEF1X. Для реализации системы был использован язык программирования Object Pascal, среда разработки - Borland Delphi. В качестве системы управления базами данных использован MS SQL Server.

В приложениях приводятся подробное математическое описание движения СА в атмосфере, зависимости аэродинамических коэффициентов СА от высоты и числа Маха.

В заключении формулируются основные результаты и выводы по работе.

Основные результаты и выводы:

1. Разработана математическая модель для статистического анализа движения спускаемого аппарата (СА) на внеатмосферном и атмосферном участках спуска с учётом достаточно полного набора известных возмущений.
2. Показано, что в случае нормального распределения начальных угловых скоростей СА закон распределения пространственного угла атаки на условной границе атмосферы (110 км) близок к распределению Симпсона (треугольное распределение). При увеличении номинальной угловой скорости закрутки СА вокруг своей продольной оси ω_{x0} распределение эволюционирует к распределению Лапласа.
3. Установлено, что выбирая номинальную ориентацию продольной оси СА при отделении и его номинальную угловую скорость вращения ω_{x0} , можно существенно изменять законы распределения угла атаки при входе в атмосферу. В частности, можно обеспечить максимум плотности распределения угла атаки при входе в атмосферу, близкий к нулю.
4. Законы распределения контролируемых характеристик движения относительно центра масс в атмосфере для статически и динамически симметричных лёгких СА и аппаратов традиционного типа близки к законам распределения Эрланга и Релея. При наличии простых видов асимметрии законы распределения практически не изменяются.
5. Разработаны методы оценки значимости возмущений для построенной статистической математической модели движения СА, основанные на методе статистических испытаний и итерационных процедурах построения аналитических моделей для рассматриваемых контролируемых характеристик движения.
6. При увеличении уровня сложной асимметрии лёгких СА плотность распределения угла атаки в характерных точках (моменты прохождения максимальных теплового потока и скоростного напора) эволюционирует к двухмодальному закону распределения. При дальнейшем увеличении уровня асимметрий максимумы плотности распределения сближаются, и закон распределения эволюционирует к нормальному закону с математическим ожиданием угла атаки, равным 90 градусам.
7. Схема возвращения лёгких СА с помощью тросовой системы даёт возможность обеспечить наиболее благоприятные условия их входа в атмосферу (высота 110 км) с точки зрения распределения угла атаки СА. Чтобы улучшить условия входа в атмосферу, необходимо обеспечить небольшую номинальную закрутку СА вокруг его продольной оси.
8. Влияние асимметрии (при одних и тех же относительных её величинах) на движение лёгких СА по сравнению с традиционными СА существенно больше. Поэтому требования по точности изготовления лёгких СА увеличиваются с точки зрения обеспечения заданной формы, статической и динамической балансировки.

9. Разработана универсальная автоматизированная информационная система статистического моделирования и анализа неуправляемого движения СА различных типов и назначения.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание диссертации опубликовано в изданиях, определённых Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации:

1. Никонова И. А., Заболотнов Ю. М. Статистический анализ движения капсулы при спуске в атмосфере с помощью космической тросовой системы [Текст] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва. – Самара: СГАУ, 2010. – №1 (21). – С. 81–90.

2. Никонова И. А., Заболотнов Ю. М. Ранжирование возмущений при спуске капсулы в атмосфере [Текст] // «Известия вузов. Авиационная техника». – Казань: КАИ, 2010. – № 4, С. 8–11.

В прочих изданиях:

1. Заболотнов Ю. М., Никонова (Щетинина) И. А. Оценка рассеивания точек посадки лёгкой спускаемой капсулы [Текст] // Сборник докладов 12-го Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара: СГАУ, 2005. – С. 67–70.

2. Заболотнов Ю. М., Никонова (Щетинина) И. А. Статистический анализ распределения угла атаки лёгкой спускаемой капсулы при спуске в атмосфере [Текст] // Тезисы докладов XXXII Самарской областной студенческой научной конференции. – Самара: СГАУ, 2006. – часть I. – С. 175–176.

3. Заболотнов Ю. М., Никонова (Щетинина) И. А. Оценка вклада различных возмущений в рассеивание точек посадки лёгкой спускаемой капсулы [Текст] // Сборник трудов Третьей Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование и краевые задачи». – Самара: СамГТУ, 2006. – С. 174–177.

4. Никонова (Щетинина) И. А. Оценка значимости возмущений в задаче движения лёгкой спускаемой капсулы в атмосфере [Текст] // Труды научно-технической конференции с международным участием «Перспективные информационные технологии в научных исследованиях, проектировании и обучении (ПИТ-2006)». – Самара: СГАУ, 2006. – Том 1. – С. 227–230.

5. Никонова (Щетинина) И. А. Автоматизированная информационная система статистического анализа движения в атмосфере лёгких спускаемых капсул. Регистрационный номер статьи 6142, 2006 г. [Электронный ресурс] Электронный многопредметный научный журнал «Исследовано в России» / МФТИ – электронный текстовый документ – М: МФТИ, 1998–2007. – Режим доступа: <http://zhurnal.are.relarn.ru/>. – Язык: Русский.

6. Заболотнов Ю. М., Никонова (Щетинина) И. А. Оценка законов распределения углов атаки лёгкой спускаемой капсулы в характерных точках её траектории спуска [Текст] // Сборник докладов 13-го Всероссийского семинара

по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара: СГАУ, 2007. – С. 155–159.

7. Заболотнов Ю. М., Никонова (Щетинина) И. А. Анализ законов распределения углов атаки лёгкой спускаемой капсулы при входе в атмосферу Земли [Текст] // Актуальные проблемы современной науки: Труды 3-го Международного форума (8-й Международной конференции молодых учёных и студентов). – Самара: Изд-во Сам ГТУ, 2007. – С.108–112.

8. Никонова И. А. Статистический анализ движения лёгких спускаемых капсул с малой асимметрией [Текст] // Сборник трудов международной конференции «Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках». – Самара: СГАУ, 2008. – С. 149.

9. Заболотнов Ю. М., Никонова И. А. Статистический анализ движения лёгких спускаемых капсул сферической формы с малой асимметрией [Электронный ресурс] – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. // Электронный сборник трудов всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России». – М: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.

Подписано в печать 22.11.2010.

Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)»
443086. Самара, Московское шоссе, 34.