

ОЦЕНКА РАССЕИВАНИЯ ТОЧЕК ПОСАДКИ ЛЕГКОЙ СПУСКАЕМОЙ КАПСУЛЫ

Передовая технология надувных и легких спускаемых капсул (ЛСК) на тросе (SpaceMail) является перспективной, так как позволяет без использования тормозной двигательной установки обеспечить доставку полезного груза с орбиты в заданный район земной поверхности. После отработки этой технологии возвращение небольших полезных грузов на Землю можно будет осуществлять значительно чаще, чем это возможно в настоящее время с помощью существующих средств доставки. В перспективе такая технология может быть применена для доставки полезных грузов с долговременной международной космической станции.

В состав системы доставки (проект YES2) в настоящее время входят: 1) FLOYD (Foton Located YES deployer) – расположенная на орбитальном космическом аппарате (КА) система развертывания нити; 2) спускаемая капсула; 3) MASS (Mechanical and data Acquisition Support System) – система обеспечения сбора данных и связи с КА.

Последовательность действий проекта YES2 такова: 1) начальное состояние: FLOYD и ЛСК Fotino находятся на батарейном отсеке Foton; 2) стабилизация Foton в вертикальном положении на высоте около 280 км; 3) развертывание троса вместе с блоком MASS и ЛСК Fotino; 4) отделение СК Fotino от блока MASS; 5) обрезание торса вблизи КА Foton; 6) спуск ЛСК и блока MASS на внеатмосферном участке (100-300 км); 7) сгорание блока MASS, фиксирующих строп и троса в атмосфере; 8) движение ЛСК в плотных слоях атмосферы; 9) приземление ЛСК.

При разработке технологии спуска легких капсул возникает ряд задач, требующих решения при их проектировании. К таким задачам можно отнести: приземление в заданный район земной поверхности, обеспечение требуемого теплового режима, приспосабливаемой конечной скорости приземления, устойчивости движения ЛСК и др. Задача по оценке рассеивания точек посадки для ЛСК приобретает особое значение в силу следующих причин: 1) траектории входа в атмосферу являются более пологими (угол входа в атмосферу составляет в среднем -1.5 град); 2) баллистический коэффициент ЛСК S/m , S – характерная площадь капсулы, m – масса капсулы, существенно больше, чем у обычных спускаемых капсул – СК (при-

близительно в 30-50 раз); 3) на большей части траектории спуска (с высот порядка 40 км) движение осуществляется с малыми скоростями (50-100 м/с). Все эти причины приводят к тому, что разброс точек посадки ЛСК возрастает и может составить сотни километров.

Поскольку капсула легкая, то особое значение при оценке разброса точек посадки приобретают случайные вариации плотности атмосферы и ветра. Так, например, при снижении с высот порядка 40 км капсула имеет низкую скорость (30-50 м/с) и влияние ветра может существенно сказаться на точке ее посадки.

Целью данной работы является создание комплекса программ статистического расчета траекторных параметров ЛСК при действии различных возмущений и оценка разбросов контролируемых характеристик движения капсулы от действия случайных вариаций плотности атмосферы и ветра.

Уравнения движения капсулы, используемые при численных расчетах, записываются в инерциальной системе координат в виде:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{V}^a, \quad \frac{d\vec{V}^a}{dt} = \frac{\vec{R}_g}{M} + \vec{g}, \quad \frac{d\vec{K}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{K} = \vec{M}_0,$$

$$\frac{d\vec{l}}{dt} = \vec{l} \times \vec{\omega}, \quad \frac{d\vec{m}}{dt} = \vec{m} \times \vec{\omega}, \quad \frac{d\vec{n}}{dt} = \vec{n} \times \vec{\omega},$$

$$J_x \frac{d\omega_x}{dt} + (J_z - J_y)\omega_y\omega_z = M_x, \quad J_y \frac{d\omega_y}{dt} + (J_x - J_z)\omega_x\omega_z = M_y,$$

$$J_z \frac{d\omega_z}{dt} + (J_y - J_x)\omega_x\omega_y = M_z,$$

где \vec{r} и \vec{V}^a - радиус-вектор и вектор абсолютной скорости центра масс капсулы; \vec{g} - вектор гравитационного ускорения; \vec{K} - вектор кинетического момента; $\vec{\omega}$ - вектор угловой скорости системы координат, на которую проектируется кинетический момент \vec{K} и аэродинамический момент \vec{M}_0 капсулы; J_x, J_y, J_z - осевые моменты инерции капсулы в главной связанной системе координат $OXYZ$; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ - компоненты угловых скоростей; M_x, M_y, M_z - компоненты аэродинамического момента; $\vec{l}, \vec{m}, \vec{n}$ - орты главной связанной системы координат $OXYZ$.

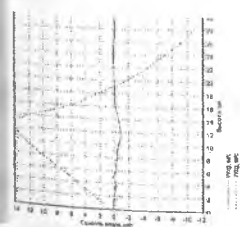
Влияние ветра на скорость движения ЛСК учитывается посредством пересчета вектора скорости относительно воздушного потока:

$$\begin{aligned}
 V_{xu} &= V_{xu}^a + \Omega_z \cdot y_u - W_{zg} \cdot \sin \varphi' \cdot \cos \lambda' - W_{zg} \cdot \sin \lambda', \\
 V_{yu} &= V_{yu}^a - \Omega_z \cdot x_u - W_{zg} \cdot \sin \varphi' \cdot \sin \lambda' + W_{zg} \cdot \cos \lambda', \\
 V_{zu} &= V_{zu}^a + W_{zg} \cdot \cos \varphi',
 \end{aligned}$$

где V_{xu}, V_{yu}, V_{zu} - проекции вектора относительной скорости на оси инерциальной системы координат $Ox_u Y_u Z_u$, $V_{xu}^a, V_{yu}^a, V_{zu}^a$ - проекции вектора абсолютной скорости, Ω_z - угловая скорость вращения Земли, W_{zg}, W_{zg} - меридиональная и зональная составляющие скорости ветра, φ' - геоцентрическая широта, λ' - геоцентрическая долгота.

При построении информационно-логической модели системы использована методология UML (Unified Modeling Language - унифицированный язык визуального моделирования). В ее контексте были построены диаграмма вариантов использования, диаграмма классов, диаграммы состояний, диаграммы деятельности, диаграмма последовательности, диаграмма кооперации, диаграмма компонентов, диаграмма развертывания. Так как проектируемая система в качестве системы управления базами данных использует MS SQL Server версии 2000, имеющий клиент-серверную архитектуру, то она включает серверную и клиентскую части. Доступ к базе данных пользователем производится путем обращения к клиентской части системы. В качестве основного интерфейса между клиентской и серверной частями выступает язык управления базами данных SQL (Structured Query Language - структурированный язык запросов). Для реализации системы использован язык программирования Object Pascal, а в качестве среды программирования - Delphi 6.0.

Разработанный комплекс программ был использован для расчета рассивания точек посадки ЛСК при действии вариаций плотности атмосферы и ветра. Плотность атмосферы изменялась в пределах 20% (три среднеквадратичных отклонения - СКО) от номинальной



плотности и имела нормальное распределение. Распределение скорости ветра по высоте соответствовало стандарту ГОСТ 24728-81 "Ветер. Пространственное и временное распределение характеристик", устанавливающему закономерности вертикального распределения характеристик ветра для высот до 30 км, и приведено на рисунке 1. Здесь W_{zg}, W_{zg} - средние значения составляющих скорости ветра.

Рисунок 1.

Результаты расчета СКО методом статистических испытаний (количество экспериментов 100) для продольной и боковой дальностей спуска капсулы представлены в таблице. Расчет спуска капсулы производился с высоты 270 км. Таким образом, можно сделать вывод, что ветер вносит незначительный вклад в разброс точек посадки ЛСК. Однако здесь следует отметить, что в настоящее время не существует достаточно достоверных данных о величине ветровых возмущений для высот свыше 30 км. Поэтому учет влияния ветра осуществляется только для высот меньших, чем 30 км.

Таблица 1

	СКО ($L_{пр}$), км	СКО ($L_{бок}$), км
При учете влияния ветра	7,2616805	1,1206704
Без учета влияния ветра	7,2647196	1,1596144

Была приведена оценка влияния ветра на вращательное движение капсулы. Влияние ветра на изменение угла атаки иллюстрируется рисунками 2 и 3, где начиная с высоты 30 км (900 сек) наблюдаются характерные возмущения угла атаки. Анализ представленных результатов показывает, что учет влияния ветра может привести к изменению значений угла атаки максимум на 6 град. Увеличение скорости ветра на 50% может увеличить величину угла атаки капсулы еще на 3 град. Влияние ветра на вращательное движение капсулы максимальное в районе высоты 30 км.

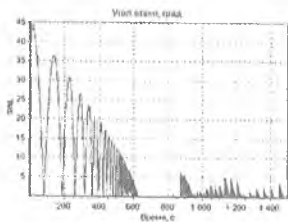


Рисунок 2

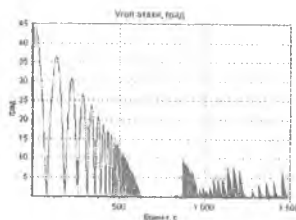


Рисунок 3