

ДВИЖЕНИЕ ЛЕГКИХ СПУСКАЕМЫХ КАПСУЛ В АТМОСФЕРЕ

Рассматривается поступательное движение и движение относительно центра масс неуправляемых спускаемых капсул в атмосфере. Проводится сравнительный анализ движений сферической и сегментально-сферической капсул, разрабатываемых в рамках проекта YES2 Европейского космического агентства "The Second Young Engineer's Satellite" (Второй спутник молодых инженеров).

Для проведения сравнительного анализа движений сферической и сегментально-сферической капсул было принято, что они имеют геометрическую и динамическую симметрию и одинаковые массовые и инерционные характеристики. Масса капсулы $m = 3$ кг, продольный момент инерции относительно центра масс $I_x = 0.04043$ кг/м², поперечные моменты инерции относительно центра масс $I_y = 0.04058$ кг/м², $I_z = 0.04058$ кг/м², характерный размер $D = 0.4$ м, центр масс находится на расстоянии $x_c = 0.22$ м от торца капсулы. Аэродинамические характеристики принимались в соответствии с [1]. Начальные условия поступательного движения: высота полета $H_0 = 120000$ м, скорость полета $V_0 = 7830$ м/с, угол наклона траектории $\theta_0 = -1.5$ град. Принято, что начальное значение угла атаки равномерно распределено в диапазоне $(0 - \pi)$.

Параметры движения спускаемой капсулы определялись численным интегрированием системы дифференциальных уравнений, описывающих движение в атмосфере твердого тела с шестью степенями свободы.

На рис. 1 и 2 показаны зависимости скоростного напора q и скорости полета V от высоты полета капсулы H :

- (1) – для сферической капсулы при любом начальном значении пространственного угла атаки α_0 ;
- (2) – для сегментально-сферической капсулы при начальном значении пространственного угла атаки $\alpha_0 = 0$ град и при начальном значении угловой скорости $\dot{\alpha}_0 = 0$ град/с;
- (3) – для сегментально-сферической капсулы при $\alpha_0 = 90$ град и при $\dot{\alpha}_0 = 0$ град/с;
- (4) – для сегментально-сферической капсулы при $\alpha_0 = 180$ град и при $\dot{\alpha}_0 = 0$ град/с;

(5) – для сегментально-сферической капсулы при $\alpha_0 = 180$ град и при $\dot{\alpha}_0 = 0.07$ град/с, когда реализуется режим зависания капсулы в окрестности неустойчивого положения равновесия ($\alpha_0 = 180$ град) до высоты $H = 102000$ м. Такой режим движения хотя и мало вероятен, но все же возможен.

Рост величины максимального скоростного напора для сегментально-сферической капсулы от увеличения начального значения угла атаки объясняется уменьшением силы бокового сопротивления при увеличении угла атаки.

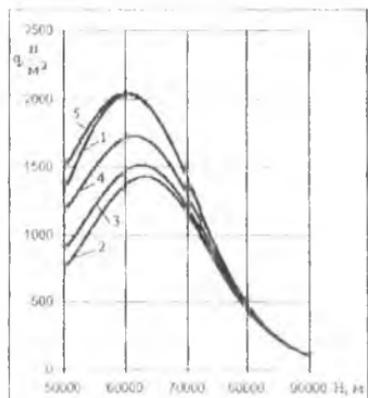


Рис 1

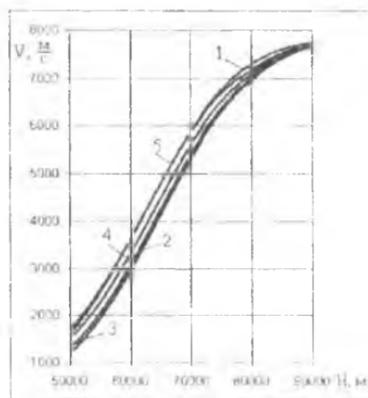


Рис 2

На рис 3 показана зависимость амплитуды пространственного угла атаки α от высоты полета капсулы H .

(1) для сферической капсулы при $\alpha_0 = 180$ град и при $\dot{\alpha}_0 = 0.07$ град/с, когда реализуется режим “зависания” капсулы в окрестности неустойчивого положения равновесия ($\alpha = 180$ град) до высоты $H = 88000$ м;

(2) для сферической капсулы при $\alpha_0 = 180$ град и при $\dot{\alpha}_0 = 0$ град/с;

(3) для сферической капсулы при $\alpha_0 = 90$ град и при $\dot{\alpha}_0 = 0$ град/с;

(4) для сегментально-сферической капсулы при $\alpha_0 = 180$ град и при $\dot{\alpha}_0 = 0.07$ град/с, когда реализуется режим зависания капсулы в окрестности неустойчивого положения равновесия ($\alpha = 180$ град) до высоты $H = 102000$ м;

(5) для сегментально-сферической капсулы при $\alpha_0 = 180$ град и при $\dot{\alpha}_0 = 0$ град/с;

(6) для сегментально-сферической капсулы при $\alpha_0 = 90$ град и при $\dot{\alpha}_0 = 0$ град/с.

Максимальное значение угловой скорости $\alpha_{\max} = 220$ град/с достигается на высотах максимального скоростного напора при движении на больших угла атаки.

Неуправляемая спускаемая капсула (СК) проектируется как статически устойчивый и обладающий геометрической и динамической симметрией объект. Однако при создании и эксплуатации возникают малые отклонения ее геометрических и динамических параметров от номинальных значений и появляется динамическая и аэродинамическая асимметрия. Малая асимметрия СК может привести к возникновению режима плоской авторотации на начальном этапе траектории входа в атмосферу, когда имеет место длительное вращение без перехода в колебательное движение, вследствие чего движение капсулы на высотах максимального скоростного напора осуществляется на больших углах атаки. Вероятность реализации режима плоской авторотации определяется в основном величиной асимметрии и начальным значением угловой скорости [2]. Ограничения, которые необходимо наложить на величину асимметрии и внеатмосферное значение угловой скорости, можно определить по формулам в интегральном виде, приведенным в [2], когда восстанавливающий аэродинамический момент капсулы описывается рядом Фурье по углу атаки. В случае, когда восстанавливающий аэродинамический момент капсулы описывается рядом Фурье по углу атаки с двумя первыми синусоидальными и первым косинусоидальным членами, указанные ограничения можно определить по аналитическим формулам, приведенным в [3]. На рис 4 показана зависимость критической угловой скорости внеатмосферного вращения сферической капсулы α_{cr} от значения m_2 - отношения среднего значения коэффициента момента асимметрии, действующего в плоскости угла атаки, к коэффициенту восстанавливающего аэродинамического момента.

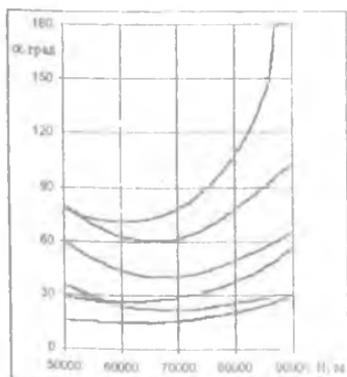


Рис 1

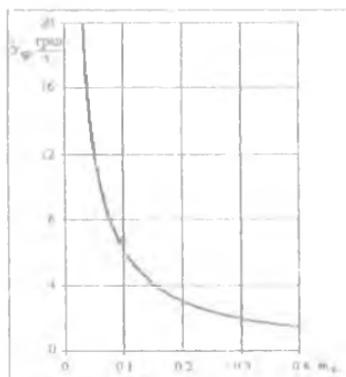


Рис 2

Наличие малой асимметрии у СК может также привести при движении в плотных слоях атмосферы к резонансным режимам движения. Особенно опасен длительный резонансный режим, при котором СК совершает движение на больших углах атаки. Такие режимы движения должны быть исключены введением ограничения на величину асимметрии [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ляскин А.С. Численное моделирование теплового состояния спускаемой капсулы при входе в атмосферу // Сб. тр. XII Всерос. научн.-техн. семинара по управлению движением и навигацией летательных аппаратов. - Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 2006.
2. Ярошевский В.А. Исследование условий возникновения плоской авторотации космического аппарата на этапе входа в атмосферу // Космические исследования, 2001, Т.39, №1, С. 45-50.
3. Кенлышов Е.А., Тимбай И.А. Переход плоского вращательного движения космического аппарата с асимметрией в колебательное при входе в атмосферу // Космические исследования, 2004, Т.42, №3, С. 295-301.
4. Ярошевский В.А. Движение неуправляемого тела в атмосфере. М.: Машиностроение, 1978.