

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЕГКИХ СПУСКАЕМЫХ КАПСУЛ ПРИ ВХОДЕ В АТМОСФЕРУ

В данной работе рассматривается атмосферный участок движения спускаемой капсулы небольшой массы (несколько килограммов).

Изначальное разделение легких капсул по форме принципиально, ибо форма аппарата непосредственно определяет основные особенности их движения в плотных слоях атмосферы. Так, например, для легкой капсулы в виде конуса со сферическим носком угол атаки не должен превосходить 90° . В ином случае ее движение относительно центра масс становится трудно прогнозируемым из-за влияния сложной формы донной части на аэродинамические характеристики аппарата. Для сферического варианта капсулы максимальный угол атаки ограничивается лишь расположением тепловой защиты на поверхности капсулы. С другой стороны, переход к более сложным формам легких капсул необходим, так как в этом случае конструкция таких капсул становится более рациональной по весовому критерию из-за более эффективного использования объема аппарата [1]. И в том, и в другом случае необходимо также обеспечить динамическую устойчивость движения капсул в плотных слоях атмосферы, исключив случаи их кувыркания, причем каждая форма требует для этого своих подходов в выборе параметров капсул.

Легкая спускаемая капсула в форме конуса со сферическим затуплением

При проектировании капсулы этой формы (рис.1) необходимо произвести выбор трех геометрических параметров: угла полураствора конуса (θ), донного радиуса (R), радиуса затупления (r_n). Эти параметры наряду с величиной смещения центра масс относительно центра давления (запасом статической устойчивости) являются основными параметрами, определяющими статическую и динамическую устойчивость движения капсулы в атмосфере. Запас статической устойчивости обеспечивается при компоновке капсулы перемещением ее центра масс вперед к лобовой части. Для данного типа капсул он должен составлять приблизительно 0.05-0.1 от характерной длины L . Радиус затупления носка капсулы необходимо сделать как можно большим, так как тепловой поток в критической передней точке лобовой части капсулы пропорционален параметру $\frac{1}{\sqrt{r_n}}$ [1]. В данной работе этот параметр принима-

ется постоянным и выбирается равным $r_n = 0.6$ м в соответствии с параметрами капсулы проекта YES2 [1]. По двум другим геометрическим параметрам капсулы R и θ в результате расчетов была построена область устойчивого движения при условии, что угол атаки не превышает 90 градусов. Полученные результаты приведены на рис.2. При построении этой области остальные параметры капсулы и начальные условия движения полагались постоянными и равными следующим значениям: смещение центра масс относительно носка $x_c = -0.4$ м, масса 20 кг, угол входа в атмосферу -1.5° , начальная угловая скорость вращения капсулы $\omega_0 = 0$. Аэродинамические характеристики конуса с затуплением вычислялись по формулам, приведенным в [2]. Рассматриваемые графики зависимости начального угла атаки от донного радиуса $\alpha_0(R)$ представляют собой семейство кривых, которые ограничивают сверху область устойчивости для различных значений угла θ . Из графиков видно, что даже при незначительном уменьшении этого параметра область устойчивости существенно расширяется, и уже при угле 35° достигает своего максимума.

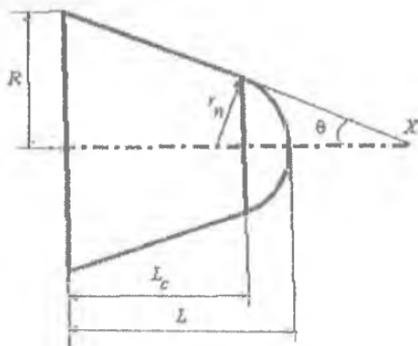


Рис. 1

Существование области неустойчивого движения капсулы проекта YES2 объясняется тем, что производная коэффициента подъемной силы по углу атаки C_{ya}^α при определенном сочетании геометрических параметров капсулы в окрестности $\alpha=0$ становится отрицательной, что обуславливает возникновение динамической неустойчивости при спуске в атмосфере [3].

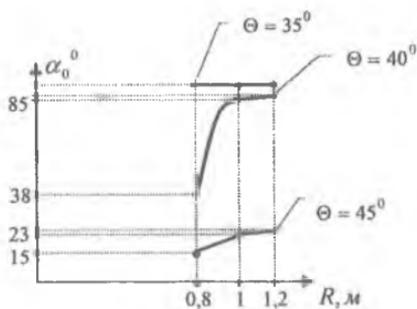


Рис.2

Наряду с обеспечением динамической устойчивости капсулы на траектории, важным является выбор таких параметров капсулы, которые гарантируют приемлемую скорость ее посадки. Величина скорости на конечном участке траектории (скорости приземления) может быть обеспечена изменением тех же геометрических параметров капсулы R и θ . Чем больше значение этих величины, тем меньше скорость у поверхности Земли. В этом случае два описанных требования (устойчивости и заданной минимально необходимой скорости приземления) находятся в противоречии и необходимость компромисса очевидна.

Легкая спускаемая капсула в форме сферы

Данная форма является наиболее простой для анализа движения. Сферические спускаемые аппараты не обладают аэродинамическим качеством, поскольку их подъемная сила равна нулю. С другой стороны, отсутствие подъемной силы является недостатком таких форм, так как демпфирующие свойства по углу атаки существенно меньше, чем для симметричных вытянутых вдоль продольной оси спускаемых аппаратов. Кроме того, критерий устойчивости несколько отличается от критерия устойчивости для аппарата в форме конуса со сферическим затуплением, так как в этом случае превышение углом атаки 90° допустимо. Важно лишь, чтобы капсула была правильно ориентирована на тех участках траектории, где тепловой поток максимален.

Сравнение траекторных параметров различных капсул

Проведем сравнения движения капсул этих двух форм с движением капсулы, имеющей параметры, близкие к параметрам стандартной капсулы. Геометрические параметры первой из них положим равными соответствующим параметрам капсулы YES-2 (донный радиус 0.8 м , радиус затупления 0.6 м , смещение центра масс относительно носка $x_c = -0.4\text{ м}$, масса 20 кг , угол полураствора 45° , начальный угол атаки 15°), второй – соответствующим параметрам капсулы ФОТИНО (масса 4 кг , радиус 0.2 м , смещение центра масс составляет 0.05 д ,

где d – диаметр капсулы, начальный угол атаки 45°). Скорость входа в атмосферу на высоте 110 км равна 7830 м/с, угол входа равен -1.2° . Параметры стандартной сферической капсулы: масса 180 кг, диаметр 0.7м, смещение центра масс $x_c=0.07$ м. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры спуска различных капсул

Величина	Капсула ФОТИНО	Капсула YES-2	Стандартная капсула
Время спуска, с	700	1600	600
Тепловой поток КДж/(м ² с)	1300	350	3500
Конечная скорость, м/с	55	12	100
Скоростной напор, Па	2500	700	5200
Высота достижения максимального теплового потока, км	72	81	48
Высота достижения максимального скоростного напора, км	60	72	35

Анализ результатов показывает, что несомненное преимущество с точки зрения основных траекторных параметров спуска имеет капсула YES2. Единственной особенностью этой капсулы является, как это было отмечено выше, необходимость выбора ее геометрических параметров из условия обеспечения динамической устойчивости при спуске в плотных слоях атмосферы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Папкратов Б.М. Спускаемые аппараты. М.: Машиностроение, 1984.
2. Аржанников Н.С., Садекова Г.С. Аэродинамика летательных аппаратов. М.: Высшая школа, 1983.
3. Zabolotnov Y. Movement of Light Re-entry Capsule Around of the Centre of Mass in an Atmosphere // Russian-European Summer Space School. European Space Agency, 2004.