

Тимбай И.А., Барина Е.В.

## РАССЕИВАНИЕ ПО БОКОВОЙ ДАЛЬНОСТИ ДЛЯ СПУСКАЕМЫХ КАПСУЛ, ВЫЗВАННОЕ ПЕРЕХОДНЫМИ РЕЖИМАМИ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ВХОДЕ В АТМОСФЕРУ

Рассматривается неуправляемое движение относительно центра масс осесимметричных капсул с бигармонической моментной характеристикой на верхнем участке траектории спуска, когда можно пренебречь изменением скорости центра масс, угла наклона траектории и аэродинамическим демпфированием. Исследуются случаи, при которых в процессе снижения происходит изменение характера движения: колебательное движение "скачкообразно" переходит в колебательное движение с другими амплитудными характеристиками, меняется тип прецессии. В результате возникает рассеивание по боковой дальности для спускаемых капсул – отклонение от номинальной траектории перпендикулярно плоскости траектории, обусловленное действием подъемной силы.

При исследовании пространственного движения неуправляемых капсул в атмосфере, как правило, рассматривают вопросы, связанные с поведением угла атаки и продольной угловой скорости вращения [1, 2]. Однако в задаче о влиянии движения капсулы относительно центра масс на рассеивание точек падения возникает вопрос об исследовании прецессионного движения. Угол прецессии определяет положение плоскости угла атаки, а следовательно, и подъемной силы относительно осей траекторной системы координат. Вопросы исследования прецессионного движения при спуске капсул рассмотрены в работах [3, 4], где приводится анализ влияния на прецессионное движение таких факторов, как переход продольной угловой скорости – угловой скорости крена через ноль; возникновение малого импульсного момента, связанного с корпусом капсулы; возникновение малого импульсного момента, связанного с набегающим потоком; резкое изменение балансирующего угла атаки.

В данной работе рассматривается поведение угла прецессии и рассеивание по боковой дальности для спускаемых капсул (СК) с двумя устойчивыми и одним неустойчивым балансирующими положениями по углу атаки, обусловленное переходными режимами движения в верхних слоях атмосферы. Такая зависимость моментной характеристики от угла атаки характерна для капсул сегментально-конической, затупленной конической и других форм.

Движение СК относительно центра масс при указанных выше допущениях описывается системой с медленно меняющимися параметрами вида [1, 2]:

$$\ddot{\alpha} + F(\alpha) = 0,$$

$$F(\alpha) = (G - R \cos \alpha)(R - G \cos \alpha) / \sin^3 \alpha + a \sin \alpha + b \sin 2\alpha, \quad (1)$$

$$\dot{\gamma}_a = \frac{G - R \cos \alpha}{\sin^2 \alpha},$$

$$R = \frac{K_0 \cos \alpha_K}{I}, \quad G = \frac{K_0 \cos \alpha_1}{I}, \quad a = a(z), \quad b = b(z),$$

где  $\alpha$  – пространственный угол атаки (угол между продольной осью капсулы и вектором скорости центра масс);  $\gamma_a$  – угол прецессии (угол скоростного крена – угол между плоскостью полета и плоскостью пространственного угла атаки);  $K_0$  – начальное значение кинетического момента;  $I$  – поперечный момент инерции капсулы;  $\alpha_K$  – угол между вектором кинетического момента и осью симметрии капсулы на внеатмосферном участке траектории;  $\alpha_1$  – угол между вектором кинетического момента и вектором скорости центра масс на границе атмосферы;  $a(z)$ ,  $b(z)$  – коэффициенты моментной характеристики;  $z$  – медленно меняющийся параметр.

Коэффициенты  $a$  и  $b$ , переменность которых связана с изменением плотности атмосферы в процессе спуска, могут быть представлены в виде:

$$a = a_0 z, \quad b = b_0 z,$$

$$a_0 = -m_a S l \rho(t_0) V_0^2 / (2I), \quad b_0 = -m_b S l \rho(t_0) V_0^2 / (2I),$$

$$z = \exp(\beta t), \quad \beta = \lambda V_0 |\sin \theta_0|,$$

где  $m_a$ ,  $m_b$  – постоянные коэффициенты,  $\rho(t_0)$  – плотность атмосферы в начальный момент времени,  $S$  – характерная площадь,  $l$  – характерный размер,  $\lambda$  – логарифмический градиент плотности по высоте,  $V_0$  – скорость полета,  $\theta_0$  – угол наклона траектории.

Начальные значения пространственного угла атаки  $\alpha_0$  и угловой скорости  $\dot{\alpha}_0$  определяются по формулам [1]:

$$\alpha_0 = \arccos(\cos \alpha_1 \cos \alpha_K - \sin \alpha_1 \sin \alpha_K \cos \psi),$$

$$\dot{\alpha}_0 = -\frac{K_0 \sin \alpha_1 \sin \alpha_K \sin \psi}{I \sin \alpha_0},$$

где  $\psi$  – угол, определяющий положение продольной оси капсулы в конусе внеатмосферной прецессии, отсчитываемый в плоскости, перпендикулярной оси прецессии.

Интеграл энергии при постоянных  $a$  и  $b$  имеет вид:

$$E = \alpha^2 / 2 + W(\alpha) = h, \quad (2)$$

$$W(\alpha) = 0.5(R^2 + G^2 - 2RG \cos \alpha) / \sin^2 \alpha - a \cos \alpha - b \cos^2 \alpha,$$

где  $W(\alpha)$  – приведенная потенциальная энергия системы.

Тип движения системы определяется соотношением величин  $a$ ,  $b$ ,  $R$ ,  $G$  и  $h$ . В плоском случае движения ( $R = G = 0$ ) имеют место три вида фазовых портретов. При этом капсула может совершать как вращательное, так и колебательное движение [2].

В пространственном случае движения присутствие в уравнении (1) гироскопического члена обуславливает только колебательный характер движения СК по углу атаки. Наличие второй гармоники в моментной характеристике приводит к возможности появления на фазовом портрете системы особой точки типа седло. В этом случае имеют место три колебательные области (рисунок 1).

В связи с изменением коэффициентов  $a$  и  $b$  в процессе движения происходит эволюция фазовых траекторий. По мере роста параметра  $z$  колебательные области растут, и тело, совершающее колебательное движение во внешней области  $A_3$ , в какой-то момент времени начинает совершать колебательное движение в одной из внутренних областей  $A_1$  или  $A_2$ . В результате «скачкообразно» изменяется амплитуда колебаний по углу атаки и возможна смена типа прецессии.

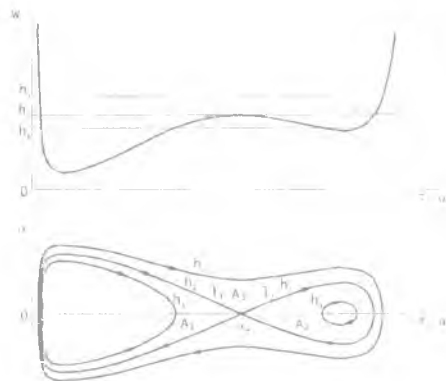


Рис. 1. Приведенная потенциальная энергия и фазовый портрет системы

Прецессию продольной оси тела относительно вектора скорости центра масс на промежутке времени, равном периоду полного оборота, противоположную по направлению данному вектору, принято называть «обратной» прецессией, а совпадающую с направлением вектора скорости центра масс – «прямой» прецессией [3].

Действие подъемной силы на рассеивание будет в среднем за время полного оборота продольной оси СК вокруг вектора скорости центра масс практически равно нулю, если пространственный угол атаки остается постоянным или изменяется медленно, а СК прецессирует вокруг вектора скорости с постоянной и большой по величине скоростью. Невыполнение этих условий приводит к тому, что полного осреднения

подъемной силы за оборот СК не происходит, в результате имеет место боковое отклонение точки падения.

Рассеивание точек падения СК из-за изменения подъемной силы можно получить, анализируя поперечную скорость, обусловленную остаточной подъемной силой в плоскости, перпендикулярной плоскости номинальной траектории СК. Поперечную скорость  $V_{\perp} = v + iw$  можно вычислить, рассматривая СК как точечную массу, совершающую движение в этой плоскости за счет воздействия на нее вращающейся подъемной силы, следующим образом [3]:

$$V_{\perp} = V_{\perp}(0) - \frac{i}{m_0} \int_0^t Y_a(\alpha) e^{i\omega t} dt,$$

где коэффициент  $i$  используется для согласования угловой и линейной координат,  $m$  – масса капсулы,  $Y_a(\alpha)$  – подъемная сила. Интеграл берется на интервале времени, в течение которого реализуется переходный режим движения по углам атаки и прецессии. Боковое рассеивание, вызванное результирующим приращением поперечной скорости  $\Delta V_{\perp}$ , приближенно можно оценить как [3]:

$$\Delta L_B = L \frac{\Delta V_{\perp}}{V_0},$$

где  $L$  – расстояние от точки, в которой начал реализовываться переходный режим движения, до точки падения.

Следует отметить, что изменение угла наклона траектории, вызванное неосредненной подъемной силой, при движении капсулы на верхнем участке траектории необходимо учитывать и при расчете ширины коридора входа СК в атмосферу.

Исследуем прецессионное движение СК со следующими параметрами:

$$I = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad K_0 = 0,142 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}, \quad a_0 = -0,002 \text{ с}^{-2}, \quad b_0 = -0,002 \text{ с}^{-2}, \\ \beta = 0,03.$$

Выберем значения углов, определяющих ориентацию капсулы на внеатмосферном участке траектории, соответствующие «обратной» прецессии:  $\alpha_1 = 1,5$  рад,  $\alpha_k = 1$  рад. На практике начальное значение угла  $\psi$  можно считать случайной величиной, распределенной равномерно в интервале  $0 \div 2\pi$  [1]. На рисунках 2 – 3 приведены результаты численного интегрирования системы (2) для следующих значений угла  $\psi$ :

1)  $\psi = 0,5$ . В этом случае капсула, совершающая колебательное движение во внешней области  $A_3$  в некоторый момент времени начинает совершать колебания в области  $A_1$  (рисунок 2). Тип прецессии не меняется, «скачкообразное» изменение угла атаки приводит к незначительному отклонению осредненного значения поперечной скорости.

2)  $\psi = 0,055267807$ . Капсула при переходе из области  $A_3$  в область  $A_2$  длительное время находится в окрестности неустойчивого положения равновесия (рисунок 3) Тип прецессии меняется с «обратной» на «прямую», и длительный интервал времени угловая скорость прецессии имеет значения, близкие к нулю. В связи с этим происходит значительное отклонение осредненного значения поперечной скорости ( $\sim 23$  м/с), что и приводит к рассеиванию по боковой дальности.

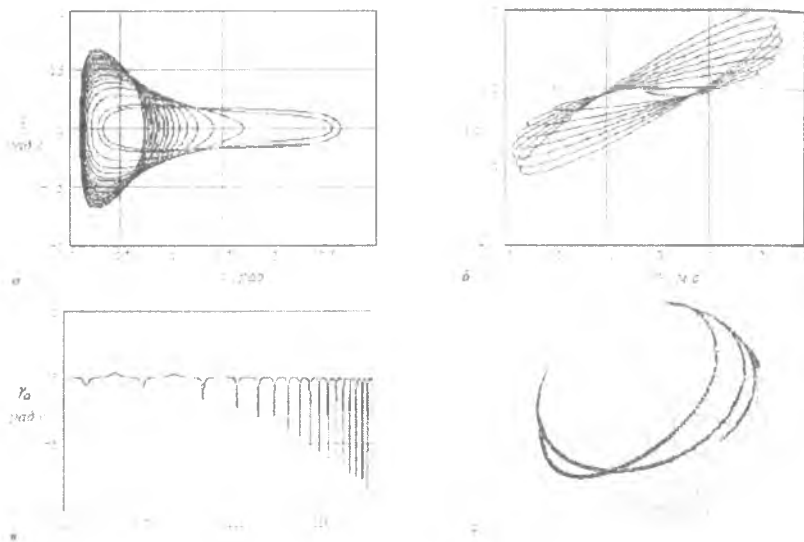


Рис. 2. Характер изменения параметров движения при  $\psi = 0,5$ :

- a* – фазовая траектория, *б* – поперечная скорость, *в* – угловая скорость прецессии, *г* – сферическое изображение движения продольной оси капсулы

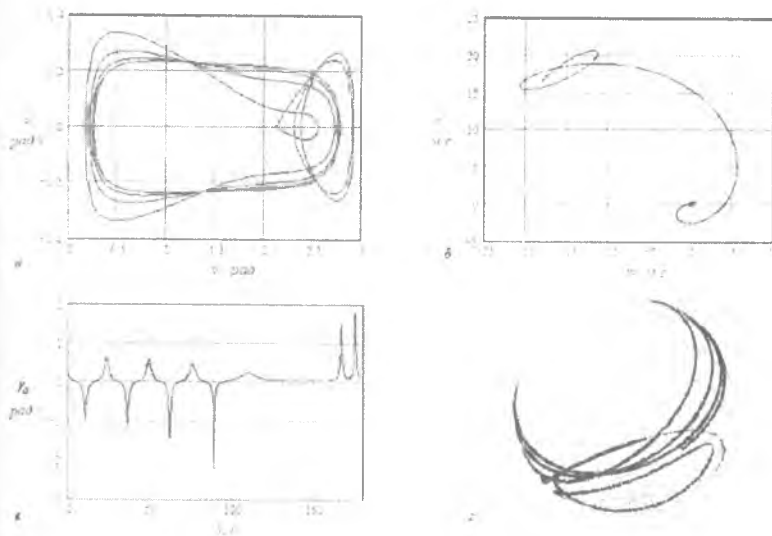


Рис. 3. Характер изменения параметров движения при  $\psi = 0,055267807$ :  
 а – фазовая траектория, б – поперечная скорость, в – угловая скорость прецессии,  
 г – сферическое изображение движения продольной оси капсулы

Таким образом, показано, что при спуске капсулы с бигармонической моментной характеристикой в верхних слоях атмосферы при «зависании» капсулы в окрестности неустойчивого положения равновесия возможна реализация малых значений угловой скорости прецессии на длительном интервале времени и, как следствие, рассеивание по боковой дальности.

#### Библиографический список

1. Ярошевский В.А. Движение неуправляемого тела в атмосфере. М.: Машиностроение, 1978.
2. Асланов В.С., Тимбай И.А. Переходные режимы углового движения КА на верхнем участке траектории спуска // Космические исследования, 1997, Т.35, №3, с. 279-286.
3. Платус Д. Рассеивание по боковой дальности для вращающихся ракет вследствие остаточной подъемной силы // Ракетная техника и космонавтика, 1977. № 7, с. 17-25.
4. Lin T., Crabowsky W., Yelmgren K., Landa M. Ballistic re-entry vehicle dispersion due to precession stoppage // Journ. Spacecraft and Rockets. 1984. V. 21. No. 4. P. 330.