УДК 531.38

Асланов В.С., Дьяков Н.Н.

ОЦЕНКА ТРАЕКТОРИЙ ПАДЕНИЯ В НЕШТАТНОЙ СИТУАЦИИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ С БАКАМИ, ЗАПОЛНЕННЫМИ ЖИДКОСТЬЮ

Под нештатной ситуацией понимается ситуация с аварийным исходом, в результате которой ракета-носитель (РН) не способен выполнить задачу по выводу полезной нагрузки на орбиту. Основными причинами возникновения нештатной ситуации являются отказы в двигательной установке и в топливной системе. Естественно, нельзя допустить, чтобы РН или ее части, падая на Землю, наносили ощутимый ущерб. Весьма важно точно очертить границы районов падения.

РН представляет собой тело с полостями, заполненными жидкостью. Жидкое топливо, имеющееся на борту ракеты, может оказывать существенное влияние на ее движение в неуправляемом режиме при нештатной ситуации. Задача динамики тела с жидкостью можно разделить на задачу вычисления тензора инерции жидкости, движущейся в баках, и классическую задачу динамики твердого тела [1]. Настоящая работа посвящена разработке математической модели движения РН с баками, частично заполненными топливом. Тензор инерции жидкости определяется для произвольного положения топлива внутри баков. Для этого вводится гипотеза о свободной поверхности жидкости, с помощью которой становится возможным найти положение жидкости внутри бака. Данная гипотеза позволяет получить модель движения РН с жидкостью для оценочных расчетов траекторий падения в нештатной ситуации.

Движение центра масс РН в вертикальной плоскости описываются законом сохранения количества движения в проекции на скоростную систему координат [2].

РН с жидкостью представляет собой систему с изменяющимися во времени моментами инерции и положением центра масс, поэтому динамические уравнения движения относительно центра масс, содержащие производные моментов инерции по времени, неудобны в применении. Для описания вращательного движения РН воспользуемся теоремой об изменения кинетического момента, которая в проекции на связанную с РН ось Cz запишется в виде

$$\frac{dK}{dt} = m_z \frac{\rho V^2}{2} S_M L + m_z^{\omega_z} \omega_z \frac{\rho V}{2} S_M L^2,$$

где ω_z – угловая скорость вращения РН, ρ – плотность воздуха, S_M – площадь миделевого сечения; L – длина РН, m_z – коэффициент момента аэродинамических сил от носительно центра масс системы, $m_z^{\omega_z}$ – коэффициент демпфирующего момента. Кинетический момент системы "РН-жидкость" определяется следующим образом

$$K_z = J_z\omega_z + L_z, \quad L_z = m_{жид}\left(y_c u_x - x_c u_y\right),$$

где J_z – момент инерции РН с жидкостью, L_z – гиростатический момент [1], x_c, y_c и u_x, u_y – координаты и проекции скорости центра масс жидкости относительно связанной с РН системы координат.

Для определения момента инерции и центра масс жидкости в баке введем в рассмотрение гипотезу, согласно которой свободная поверхность жидкости является плоскостью, нормаль которой коллинеарна вектору результирующей силы R, действующей на жидкость. Направление вектора R, которое можно определить углом $\chi \in [-\pi, \pi]$ (рис. 1), позволяет найти положение жидкости в баке.

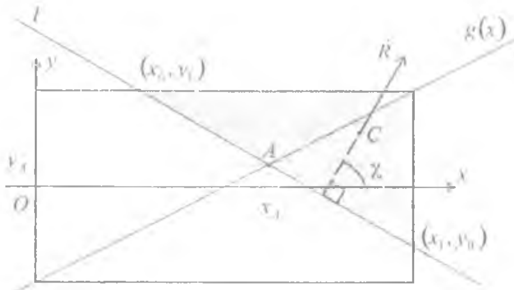

Рис. 1. Определение положения линии свободной поверхности жидкости l

Момент инерции жидкости $J_{жид\,z}$ является функцией угла χ, зависящего от времени, и вычисляется по формуле

$$J_{жид\,z}(\chi) = \int\limits_{x_0(\chi)}^{x_1(\chi)} \int\limits_{y_0(\chi)}^{y_1(\chi)} \int\limits_{z_0(x,y)}^{z_1(x,y)} \rho_{жид}\left(x^2 + y^2\right) dz\,dx\,dy, \tag{1}$$

где пределы z_0, z_1 определяют форму бака по оси Oz; x_0, x_1, y_0, y_1 – точки пересечения линии свободной поверхности l со стенками бака (рис. 1). Положение линии l для данного объема жидкости V_0 определяется с помощью угла χ и точки $A(x_A, y_A)$, через которую она проходит. Координаты точки A находятся из системы

$$\begin{cases} V(\chi, x_A, y_A) - V_0 = 0, \\ y_A = g(x_A), \end{cases} \tag{2}$$

где $g(x)$ – прямая, вдоль которой ищутся координаты; $V(\chi, x_A, y_A)$ – функция объема жидкости, аргументы которой определяют положение линии свободной поверхности, вычисляемая следующим образом

$$V(\chi, x_A, y_A) = \int\limits_{x_0(\chi, x_A, y_A)}^{x_1(\chi, x_A, y_A)} \int\limits_{y_0(\chi, x_A, y_A)}^{y_1(\chi, x_A, y_A)} \int\limits_{z_0(x,y)}^{z_1(x,y)} dz dx dy .$$

Координаты центра масс жидкости вычисляются по формулам:

$$x_c(\chi) = \frac{1}{V_0} \int\limits_{x_0(\chi)}^{x_1(\chi)} \int\limits_{y_0(\chi)}^{y_1(\chi)} \int\limits_{z_0(x,y)}^{z_1(x,y)} x dz dx dy , \quad y_c(\chi) = \frac{1}{V_0} \int\limits_{x_0(\chi)}^{x_1(\chi)} \int\limits_{y_0(\chi)}^{y_1(\chi)} \int\limits_{z_0(x,y)}^{z_1(x,y)} y dz dx dy . \tag{3}$$

Момент инерции системы, включающей в себя корпус РН и N баков, определяется формулой

$$J_z(\chi) = J_{корп\, z} + \sum_{i=1}^{N} J^{i}_{жидк\, z}(\chi) .$$

В результате вычисление момента инерции и координат центра масс РН заключается в интегрировании (1) и (3) для каждого бака РН с предварительным решением системы (2) для каждого χ и требует больших вычислительных затрат.

В качестве исследуемой модели ракеты рассмотрим боковой блок (ББ) РН "Союз", который имеет два бака для керосина и жидкого кислорода. Численное моделирование плоского движения ББ проведем для ряда комбинаций уровня заполнения баков рабочим телом (k_1, k_2) и сравним их с четырьмя моделями ББ, у которых жидкость «заморожена» в фиксированных положениях: $\chi = \{0,\ \pi,\ \pi/2,\ -\pi/2\}$.

На рисунках 2-5 представлены траектории движения ББ имеющие наибольшую и наименьшую дальность полета ББ с "замороженной" жидкостью и траектория со свободно движущейся в баках жидкостью.

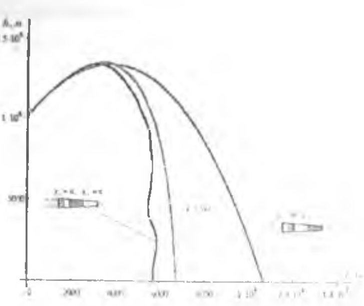

Рис. 2. Траектории ББ при $k_1 = 0{,}4$, $k_2 = 0{,}6$

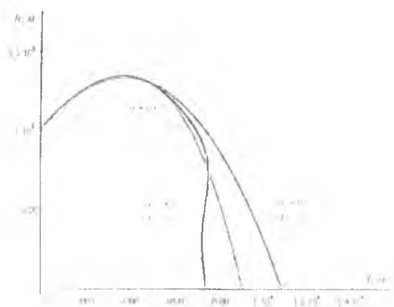

Рис. 3. Траектории ББ при $k_1 = 0{,}5$, $k_2 = 0{,}5$

Из рисунков 2-5 следует, что наибольшая дальность полета соответствует модели с "замороженной" жидкостью в положении, при котором расстояние между центром масс жидкости каждого бака и центром давления ББ максимально ($\chi_1 = \chi_2 = 0$).

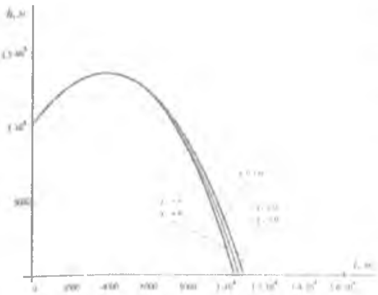

Рис. 4. Траектории ББ при κ_1=0,7, κ_2=0,2

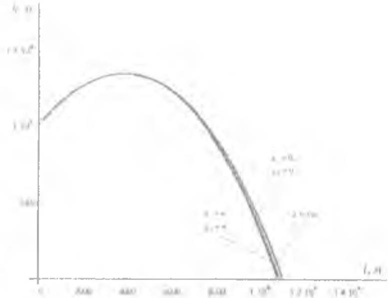

Рис. 5. Траектории ББ при κ_1=0,9, κ_2=0,9

Таким образом, используемая гипотеза о свободной поверхности жидкости позволяет для оценки траектории падения построить математическую модель плоского движения РН с баками, содержащими жидкость. В случае, когда использование данной гипотезы не представляется возможным, достаточно ограничиться рассмотрением моделей с различным сочетанием "замороженной" жидкости в баках.

Библиографический список

1. Черноусько Ф.Л. Движение твердого тела с полостями, содержащими вязкую жидкость. М., ВЦ АН СССР, 1968.
2. Андреевский В. В. Динамика спуска космических аппаратов на Землю. М., "Машиностроение", 1970.