

ОЦЕНКА ВЕТРОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОВАНИЕМ ТОПЛИВА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Исследуются пути улучшения оптимальных параметров успокоителей датчиков уровня системы управления расходом топлива (СУРТ). Проводится сравнительный анализ таких систем в существующих и перспективных ракетах-носителях (РН). Предлагается оценить возмущения, действующие на СУРТ от ветровых возмущений, при терминальной системе управления движением РН. Исследование проводится при помощи математического моделирования с целью определения возможных диапазонов колебаний уровня в трубе датчика СУРТ при действии ветровых возмущений на РН.

СУРТ предназначена для обеспечения заданного соотношения компонентов топлива и одновременного опорожнения баков к моменту окончания работы двигателей РН. Систему можно рассматривать как регулятор соотношения мгновенных расходов компонентов, который поддерживается в определённом допустимом интервале. В современных и перспективных РН характерной особенностью является наличие терминальной СУ движением, позволяющей снизить нагрузки на корпус носителя. Такое управление допускает снос по направлению действия ветра. Однако боковой снос РН приводит к достаточно сильным возмущениям в каналах СУРТ, что может приводить к отклонению момента срабатывания его чувствительного элемента

В качестве чувствительного элемента системы используются ёмкостные датчики уровня, осуществляющие дискретно контроль за опорожнением компонентов и представляющие собой трубу небольшого диаметра. В нижней части трубы имеется фланец для крепления к днищу бака и пагубки успокоительной системы. Датчики, как правило, устанавливаются в центре бака по возможности ближе к продольной оси бака, что уменьшает влияние колебаний свободной поверхности жидкости на точность определения уровня жидкости. Успокоители представляют собой две дополнительные трубы меньшего диаметра, выходы которых в баке располагаются на диаметрально противоположных сторонах бака. Они позволяют исключить резонансные взаимодействия столба жидкости внутри датчика с угловыми и линейными движениями корпуса РН. Схема расположения успокоителей в баках и возможная их конфигурация представлена на рис. 1.

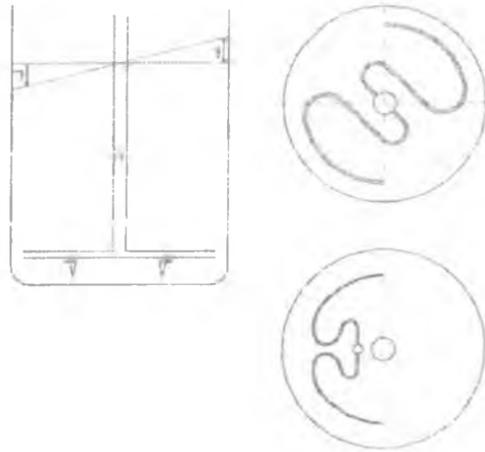


Рис. 1. Возможные конфигурации успокоителей в баке

При колебаниях свободной поверхности жидкости изменение нивелирной высоты $\pm \Delta h$ над входами успокоителя в таких системах не приводит к возмущению по отношению к среднему уровню жидкости в баке. Однако в случае терминального управления движением РН на успокоители будет действовать поперечное ускорение α , которое в трубе датчика создаст увеличение или уменьшение давления в зависимости от направления вектора внешнего ускорения α и вектора скорости V движения жидкости в трубах успокоителях. Действие поперечного ускорения α приведёт к увеличению пьезометрической высоты в трубе датчика уровня ΔH и составит

$$\Delta H = \frac{2\alpha \rho \sin \gamma S l}{S \rho g^*} = 2B \frac{\alpha}{g^*}, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ; S – площадь поперечного сечения успокоителя, м^2 ; g^* – ускорение по продольной оси ракеты-носителя, м/с^2 ; l – длина успокоителя, м ; $B = l \sin \gamma$ – расстояние от оси трубы датчика уровня до продольной оси бака, м ; γ – угол между диаметральной плоскостью бака и успокоителем.

Соотношению (1) удовлетворяет любая конфигурация успокоителей, симметричных относительно плоскости, проходящей через продольные оси бака и датчика. Появление бокового ускорения во время полёта РН в условиях ветровых возмущений приводит к дополнительным рассогласованиям уровня $\Delta H(t)$ между уровнем в баке и уровнем в трубке датчика.

Столб жидкости в трубе датчика представляет колебательную систему, соб-

ственная частота которой определяется длиной смоченной части трубы датчика и длиной труб успокоителей. Движение жидкости внутри трубы датчика является суммой движения жидкости со скоростью опускания уровня и колебаниями столба жидкости внутри датчика. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний уровня относительно номинального движения имеет вид:

$$\Delta \ddot{h} + \eta \Delta \dot{h} + \omega^2 \Delta h = \omega^2 \Delta H(t), \quad (2)$$

где Δh – отклонение уровня жидкости от невозмущённого положения уровня в трубе датчика, м; ω – собственная частота колебаний столба жидкости в трубе датчика, равная: $\omega = \sqrt{g_x / l_g}$, $g_x = n_x g$, $l_g = l + S_0 l_y / 2 S_y$, где n_x – продольная перегрузка, g – ускорение свободного падения, м/с²; l – длина смоченной части трубы датчика, м; l_y – длина успокоителя, м; S_0 – площадь поперечного сечения трубы датчика, м²; S_y – площадь поперечного сечения трубы успокоителя, м²; η – коэффициент демпфирования колебаний жидкости в датчике уровня; $\Delta H(t)$ – разность между уровнем жидкости в баке и уровнем жидкости внутри датчика.

В этом выражении функция $\Delta H(t)$ является внешним возмущающим воздействием. Она зависит от работы системы управления движением и реакции корпуса РН на возмущающее и управляющее воздействие.

Алгоритм учёта возмущающего воздействия на СУРТ сводится к следующему.

Боковое ускорение в зоне расположения успокоителей определяется по формуле

$$a(t) = \ddot{y}_{ym}(t) \pm L \ddot{\theta}(t),$$

где $\ddot{y}_{ym}(t)$ – линейное ускорение центра масс ракеты-носителя в поперечном направлении, м/с²; $\ddot{\theta}$ – угловое ускорение колебаний продольной оси корпуса ракеты-носителя в возмущённом движении, 1/с²; L – расстояние от центра масс ракеты-носителя до сечения корпуса, в зоне которого расположены успокоители, м.

Это ускорение вычисляется в зависимости от скорости ветра по высоте и результатам моделирования движения РН в условиях ветровых возмущений.

При известном ускорении $a(t)$ можно определить $\Delta H(t)$, и решение уравнения (2) при произвольной внешней нагрузке может быть представлено в виде

$$\Delta h(t) = \sum_{i=1}^n \omega \Delta H_i(t) \Delta t \cdot \sin(t - \Delta t \cdot n), \quad (3)$$

где i – номер импульса внешнего возмущения с достаточно малой длительностью Δt ,

на которые можно разделить весь интервал времени $(0 \div T)$ действия $\Delta H(t)$.

При определении колебаний жидкости по уравнению (3) функцию $\Delta H(t)$ разбивают на импульсы $\Delta H_i(t)$. Решение тогда будет представлять сумму гармонических движений от каждого импульса $\Delta H_i(t)$ и будет в значительной мере зависеть от спектра частот внешнего воздействия.

Колебания уровня в датчике являются функцией времени, т.к. определяются длиной смоченной части трубы и текущей перегрузкой, а также демпфирующими свойствами этих колебаний, которые зависят от конкретной конструкции всех элементов гидравлического тракта в смоченной части трубы датчика и успокоителя.

Графики колебаний уровня жидкости в трубе с учётом движения уровня жидкости в баке $H(t)$ для РН нового поколения представлены на рисунках 2 и 3.

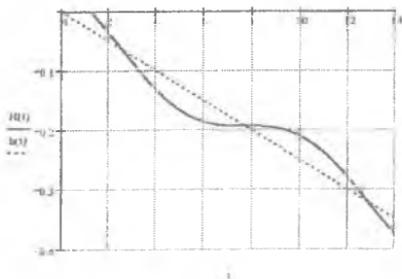


Рис. 2. $v = 0,025$ м/с; $l = 1,8$ м

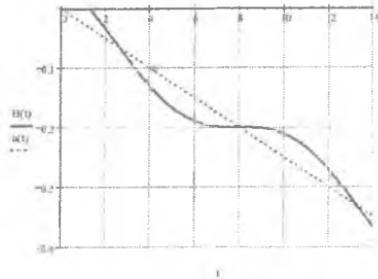


Рис. 3. $v = 0,025$ м/с; $l = 2,3$ м

Здесь $h(t)$ – опускание уровня без учёта движения жидкости в трубе; v – скорость опускания уровня жидкости в трубе; l – длина успокоительных устройств.

По рассмотренной методике проведена оценка ветровых возмущений, действующих на СУРТ. Результаты анализа показали, что такие возмущения могут привести к отклонению от момента номинального срабатывания чувствительного элемента до 25% от интервала времени невозмущённого движения уровня в трубе одного из датчиков. Получение устойчивых к данному типу возмущений алгоритмов СУРТ возможно на базе статистического моделирования, учитывающего всё многообразие воздействия ветра, реакции работы СУ движением и учёта реальных демпфирующих свойств гидравлического тракта датчика.