

При динамическом нагружении (7): осевое сжатие: $\sigma_{11}^* = (1)$, $\gamma = 1$, чистый изгиб: $\gamma=1,1$, неравномерное сжатие: $\gamma=(3.1.3)$.

$$K_{pf} = \left(\frac{aE}{c_{\sigma} R} \right)^2 \left(\frac{h}{R} \right)^2 \sigma_{11}^* \cdot e_m \cdot \gamma \cdot k^{-1} \quad (16)$$

E — любое из E_1, E_2 , например E_1 , a — скорость звука в материале в направлении E_1 .

Для монолитного заполнителя и заполнителя с $R_0/R < 0,8$, где R, R_0 — наружный и внутренний радиус заполнителя соответственно.

$$k^* = 1 + \frac{\gamma_3}{\gamma} \left(\frac{R}{h} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{\rho_m (1 + e_{mn}^2)^{1/2}} \quad (17) - [1,3], \text{ где } \gamma_3, \gamma -$$

удельный вес материала заполнителя и оболочки соответственно.

Список литературы

1. Бердников Ю.Н. Приближенные методы решения задач устойчивости элементов конструкций летательных аппаратов и их двигателей. - Уфа: УАИ, 1979. 96 с.
2. Бердников Ю.Н., Бердников Е.Ю. О критерии трещиностойчивости. //Прочность конструкций. Межвузовский научный сборник. УФА, 1996, с. 165-167.
3. Грегोलюк Э.И., Сребовский А.М. Тонкие круговые оболочки под действием импульса внешнего давления. //МТТ, 1965, №5.
4. Ильгамов М.А., Иванов В.А., Гулин Б.В. Прочность, устойчивость и динамика оболочек с заполнителем. -М.: Наука, 1977.
5. Королев В.И. Слоистые анизотропные пластинки и оболочки из армированных пластмасс. -М.: Машиностроение, 1996.

МИНИМИЗАЦИЯ ОСТАТКОВ ТОПЛИВА В БАКАХ ЖРД

Бабкин А.И.

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, г. Москва.

При выборе массового соотношения компонентов топлива в камере ЖРД исходят из условий максимальной экономичности двигательной установки и эффективности изделия в целом. Зависимость удельного импульса двигателя от соотношения компонентов топлива имеет пологий

максимум. Это позволяет свести задачу регулирования K_m к задаче его стабилизации.

Учитывая указанный факт, величину действительного соотношения компонентов топлива можно скорректировать исходя из условия обеспечения минимума остаточного количества топлива в баках. Дело в том, что при заправке топлива в баки заправочное соотношение компонентов топлива будет несколько отличаться от его расчетного значения. Это отличие связано с погрешностью работы агрегатов системы заправки, температурой топлива при заправке, способом заправки и т.п. После определения величины заправочного соотношения компонентов необходимо, с целью уменьшения остатков топлива в баках, перенастроить стабилизатор соотношения на это значение. Отклонение заправочного соотношения компонентов топлива от его оптимального не должно уменьшать экономичности двигательной установки. Отличие действительного значения K_m от его заправочного значения приведет к тому, что один из компонентов израсходуется ранее положенного времени, а часть другого останется в баке. Недоработка по времени и увеличение конечной массы ракеты могут привести к невыполнению поставленной задачи. Ниже приводится расчет остающегося в баках компонента в зависимости от точности работы стабилизатора соотношения компонентов топлива. Рассматриваются два случая. Первый - в остатке остается окислитель. Второй - остается горючее.

Первый случай соответствует тому, что действительное значение соотношения компонентов K_m меньше заправочного значения K_m^* , т.е. $K_m < K_m^*$. Это возможно в результате того, что или расход окислителя меньше расчетного значения, или расход горючего больше расчетного значения, или в результате того и другого. На основании этого можно записать

$$K_m = \frac{\dot{m}_0^* - \Delta \dot{m}_0}{\dot{m}_r^* + \Delta \dot{m}_r} . \quad (1)$$

Здесь $\Delta \dot{m}_0, \Delta \dot{m}_r$ - отклонения расходов окислителя и горючего от их принятых значений.

За время t работы двигателя будет израсходовано топливо в количестве $(\dot{m}_0^* - \Delta \dot{m}_0)t + (\dot{m}_r^* + \Delta \dot{m}_r)t$.

С другой стороны, израсходованное количество топлива можно представить в виде разности запасенного в баках топлива m_Σ и оставшегося к моменту времени t в баках m_{oc} .

Если за t принять время полного израсходования горючего, то в остатке будет окислитель в количестве $m_{ост.о}$, и тогда можно записать

$$\left[(\dot{m}_0^* - \Delta \dot{m}_0) + (\dot{m}_r^* + \Delta \dot{m}_r) \right] t = m_{\Sigma} - m_{\text{ост}} \quad (2)$$

Отсюда время работы двигателя до полного израсходования горючего составит

$$t = \frac{m_{\Sigma} - m_{\text{ост}}}{(\dot{m}_0^* - \Delta \dot{m}_0) + (\dot{m}_r^* + \Delta \dot{m}_r)} \quad (3)$$

Решая совместно уравнения (1) и (3), получим

$$t = \frac{m_{\Sigma} - m_{\text{ост}}}{(\dot{m}_0^* - \Delta \dot{m}_0) + \left(\frac{1 + K_m}{K_m} \right)} \quad (4)$$

Для разрешения этого уравнения необходима дополнительная зависимость, которую получим следующим образом.

Количество остающегося окислителя складывается из двух составляющих. Во-первых, окислитель остается в результате того, что каждую секунду его расходуется на $\Delta \dot{m}_0$ меньше расчетного значения. За время работы двигателя t это количество недоиспользованного окислителя составит $(\Delta \dot{m}_0 \cdot t)$.

Во-вторых, в результате того, что двигатель не доработает до расчетного значения Δt , так как расход горючего превышает расчетное значение на $\Delta \dot{m}_r$, в баке остается дополнительное количество окислителя, которое составит $\Delta t \cdot \dot{m}_0^*$. Это действительно так, поскольку время работы двигателя выбиралось из условия номинального расхода окислителя $\dot{m}_0^*$.

Время Δt , которое не доработал двигатель до расчетного значения, в результате того, что имел место перерасход горючего, можно представить в виде

$$\Delta t = \frac{\Delta \dot{m}_r \cdot t}{\dot{m}_r^*}$$

В результате количество окислителя, оставшегося в баке к моменту времени t , будет равно

$$m_{\text{ост}} = \Delta \dot{m}_0 \cdot t + \Delta t \cdot \dot{m}_0^* = t \left[\Delta \dot{m}_0 + K_m^* \Delta \dot{m}_r \right]$$

Отсюда, время работы двигателя t равно

$$t = \frac{m_{\text{ост}}}{\Delta \dot{m}_0 + K_m^* \Delta \dot{m}_r} \quad (5)$$

Подставляя в это уравнение значение $\Delta \dot{m}_T$, полученное из уравнения (1) будем иметь

$$t = \frac{m_{\text{ос то}}}{\frac{K_m^* - K_m}{K_m} (\dot{m}_0^* - \Delta \dot{m}_0)} \quad (6)$$

Приравнявая правые части уравнений (6) и (4), получаем

$$\frac{m_{\text{ос то}}}{K_m^* - K_m} = \frac{m_\Sigma - m_{\text{ос то}}}{1 + K_m}.$$

После несложных преобразований будем иметь

$$\frac{1 - m_{\text{ос то}} / m_\Sigma}{\frac{m_{\text{ос то}}}{m_\Sigma}} = \frac{1 + K_m}{K_m^* - K_m}.$$

Введем обозначение $\Delta K_m = K_m^* - K_m$. Эта величина положительная, т.к. рассматривается случай $K_m < K_m^*$. И в результате будем иметь

$$\Delta K_m = \frac{m_{\text{ос то}}}{m_\Sigma} (1 + K_m^*) \quad (7)$$

А в относительных величинах

$$\delta K_m = \frac{\Delta K_m}{K_m^*} = \frac{m_{\text{ос то}}}{m_\Sigma} \cdot \frac{1 + K_m^*}{K_m^*} \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8) видно, что относительное количество оставшегося окислителя в баке пропорционально отклонению заправочного соотношения компонентов топлива от его действительного значения. Кроме того, остаточное количество окислителя зависит от номинального значения соотношения компонентов и для более высоких значений K_m^* оно больше при одном и том же.

Равенства (7) и (8) позволяют определить относительную погрешность исходя из заданного значения величины $m_{\text{ос то}} / m_\Sigma$.

Аналогично может быть рассмотрен и другой случай, когда действительное соотношение компонентов топлива больше заправочного, т.е.

$K_m > K_m^*$. Это соответствует тому, что в остатке будет горючее, при полном израсходовании окислителя. В этом случае

$$K_m = \frac{\dot{m}_0^* + \Delta \dot{m}_0}{\dot{m}_r^* - \Delta \dot{m}_r} \quad (9)$$

Проведя преобразования, аналогичные рассмотренному выше случаю, получим соотношение

$$\frac{m_{осп} / m_{\Sigma}}{1 - \frac{m_{осп}}{m_{\Sigma}}} = \frac{\Delta K_m}{K_m^* (1 + K_m^*) + K_m^* \cdot \Delta K_m} \quad (10)$$

В относительных величинах это соотношение записывается в виде

$$\frac{m_{осп} / m_{\Sigma}}{1 - \frac{m_{осп}}{m_{\Sigma}}} = \frac{\delta K_m}{(1 + K_m^*) + K_m^* \cdot \delta K_m} \quad (11)$$

Если учесть, что $K_m \cdot \delta K_m \ll (1 + K_m^*)$ и $m_{осп} / m_{\Sigma} \ll 1$, тогда приближенно можно записать

$$\delta K_m = \frac{m_{осп}}{m_{\Sigma}} \cdot (1 + K_m^*) \quad (12)$$

В общем случае важно не какой компонент, а какое его количество останется в баке. В этом смысле целесообразно оценить, к чему стремится, чтобы оставался в баке окислитель или горючее. Оптимальным, естественно, будет случай, при котором при одной и той же точности работы стабилизатора соотношения компонентов останется меньшее количество компонентов. Для этого приравняв правые части уравнений (8) и (12), получим

$$\frac{m_{ост}}{m_{\Sigma}} \cdot \frac{1 + K_m^*}{K_m^*} = \frac{m_{осп}}{m_{\Sigma}} \cdot (1 + K_m^*) \quad (13)$$

В результате имеем

$$m_{ост} = m_{осп} \cdot K_m^* \quad (14)$$

Отсюда видно, что остающееся количество окислителя в K_m^* раз больше остающегося горючего.