

О МЕХАНИЗМЕ УСИЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Г. К. Каракозов, Г. В. Россихин (Москва)

Взаимодействие акустического возмущения с реакционным слоем твердого топлива исследуется в теоретических работах [1, 2] путем анализа зависимости от давления так называемой скорости горения топлива. В условиях динамической перестройки параметров реакционного слоя топлива понятие «скорости горения», очевидно, лишено достаточно строгого смысла. С другой стороны, попытки точного расчета нестационарных процессов в слое химической реакции топлива [3] приводят к громоздким выражениям, содержащим большое количество параметров, экспериментальное определение которых затруднительно.

В настоящей статье формулируется простое условие усиления акустической волны поверхностью горения твердого топлива, в котором рассматривается закон изменения с давлением массы среды, заключенной в слое химической реакции топлива.

Выделим два плоских сечения с фиксированным расстоянием между ними: первое, обозначенное знаком (-), в газовой фазе, где реакция уже прошла (фигура). Тепловой поток через сечение (-) составляет заданную малую величину, причем слева от этого сечения изменение всех параметров можно считать изоэнтропическим. Справа от сечения (+) среду можно считать идеальным газом постоянного химического состава. Кривая 1 показывает распределение плотности в выделенном слое при стационарном процессе горения, кривая 2 показывает адиабатическое распределение плотности в выделенном слое при скачке давления, возникшем в результате прохождения фронта акустической волны, кривая 3 показывает стационарное распределение плотности в выделенном слое при новом значении давления.

Исключим скорость системы сечений V из соотношений

$$u = v - V, \quad m_- = \rho_- u$$

записанных для сечений (-) и (+), где u , v — относительная и абсолютная скорости среды, m и ρ — поток массы и плотность среды. Переходя к безразмерным значениям отклонений параметров (помечены штрихом)

$$v_-' = \frac{\delta v_-}{u_-}, \quad v_+' = \frac{\delta v_+}{u_+}, \quad \rho_-' = \frac{\delta \rho_-}{\rho_-}, \quad \rho_+' = \frac{\delta \rho_+}{\rho_+}, \quad m_-' = \frac{\delta m_-}{m_-}, \quad m_+' = \frac{\delta m_+}{m_+}$$

(здесь u_- , u_+ , ρ_- , ρ_+ , m_- , m_+ — стационарные значения соответствующих параметров), получим

$$v_+' - \frac{\rho_+}{\rho_-} v_-' = m_+' - \rho_+' - \frac{\rho_+}{\rho_-} (m_-' - \rho_-') \quad (1)$$

Для отклонений плотности на границах слоя имеем

$$\rho_+' = p' - h_+', \quad \rho_-' = p' \frac{p}{\rho_- c^2} \quad (2)$$

где p' , h_+' — отклонения давления и энтальпии среды, c — скорость звука. Разность давлений на границах слоя имеет порядок $(u/c)^2$, и ею пренебрегаем. Записывая закон сохранения массы M среды в слое:

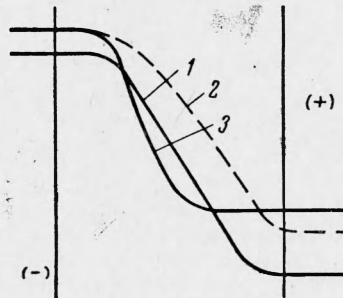
$$m_-' - m_+' = \frac{M}{m} \frac{dM'}{dt} \quad (3)$$

из (1) — (3) имеем

$$v_+' - \frac{\rho_+}{\rho_-} v_-' = \left(1 - \frac{\rho_+}{\rho_-}\right) m_-' + h_+' - p' \left(1 - \frac{\rho_+}{\rho_-} \frac{p}{\rho_- c^2}\right) - \frac{M}{m} \frac{dM'}{dt} \quad (4)$$

В режиме гармонических колебаний зависимость величин m_-' , h_+' , M' от давления может быть выражена в операторной форме (ω — частота колебаний)

$$\frac{m_-'}{p'} = m_-^*(\omega), \quad \frac{h_+'}{p'} = h_+^*(\omega), \quad \frac{M'}{p'} = M^*(\omega) \quad (5)$$



Из (4) и (5), используя акустическое соотношение

$$v'_- = -p' \frac{p}{\rho_- c_- u_-}$$

для акустической проводимости поверхности горения (см. [1]), получим

$$\begin{aligned} Z(\omega) &= \frac{u_+ v'_+}{c_+ p'} = \frac{p}{c_+} \frac{\partial v_+}{\partial p} = \frac{u_+}{c_+} Z_0(\omega) - \frac{p}{\rho_- c_- c_+} \\ Z_0(\omega) &= \left(1 - \frac{\rho_+}{\rho_-}\right) m_-^* + h_+^* - \left(1 - \frac{\rho_+}{\rho_-} \frac{p}{\rho_- c_-^2}\right) - \frac{M}{m} M^* j\omega \end{aligned} \quad (6)$$

Собственно эффект взаимодействия акустического возмущения с реакционным слоем топлива характеризуется акустической проводимостью

$$\frac{u_+}{c_+} Z_0(\omega)$$

На низких частотах имеем, очевидно

$$\begin{aligned} |m_-^*(\omega\tau \ll 1)| &= v - \text{стационарный закон горения с показателем } v \\ |h_+^*(\omega\tau \ll 1)| &= 0 - \text{постоянство энтальпии топлива} \end{aligned}$$

Здесь τ — время, характерное для процесса перестройки параметров реакционного слоя. В силу этого

$$Z_0(\omega\tau \ll 1) = -1 + v \left(1 - \frac{\rho_+}{\rho_-}\right) + \frac{\rho_+}{\rho_-} \frac{p}{\rho_- c_-^2} \quad (7)$$

На низких частотах при

$$v < \left(1 - \frac{\rho_+}{\rho_-} \frac{p}{\rho_- c_-^2}\right) \left(1 - \frac{\rho_+}{\rho_-}\right)^{-1}$$

реакционный слой топлива ослабляет акустические колебания, так как $\text{Re} Z_0 < 0$.

На высоких частотах изменения параметров вне слоя химической реакции будем считать адиабатическими, поэтому

$$m_-^*(\omega\tau \gg 1) = 0, \quad h_+^*(\omega\tau \gg 1) = \frac{k-1}{k}$$

k — показатель адиабаты продуктов горения. В силу этого выражение для акустической проводимости на высоких частотах принимает вид

$$Z_0(\omega\tau \gg 1) = -\left(i - \frac{\rho_+}{\rho_-} \frac{p}{\rho_- c_-^2}\right) + \frac{k-1}{k} + \xi, \quad \xi = \lim_{\omega\tau \rightarrow \infty} \frac{j\omega M^*(\omega)}{m/M} \quad (8)$$

Постулируем, например, простую релаксационную зависимость

$$M^*(\omega) = \frac{\mu_0 + j\omega\tau\mu_\infty}{1 + j\omega\tau}; \quad \mu_0 = \left(\frac{\partial M}{\partial p}\right)_0 \frac{p}{M}, \quad \mu_\infty = \left(\frac{\partial M}{\partial p}\right)_\infty \frac{p}{M_1}$$

— адиабатическая и стационарная чувствительности массы реакционного слоя к давлению. Для этого случая имеем из (8)

$$\text{Re} \xi = \frac{p}{m\tau} \left\{ \left(\frac{\partial M}{\partial p}\right)_\infty - \left(\frac{\partial M}{\partial p}\right)_0 \right\} \quad (9)$$

Выражения (8) и (9) показывают, что усиление акустической волны поверхностью горения топлива на высоких частотах происходит при

$$\frac{p}{m\tau} \left\{ \left(\frac{\partial M}{\partial p}\right)_\infty - \left(\frac{\partial M}{\partial p}\right)_0 \right\} + \frac{k-1}{k} - \left(i - \frac{\rho_+}{\rho_-} \frac{p}{\rho_- c_-^2}\right) > 0 \quad (10)$$

Поступила 5 IV 1964

ЛИТЕРАТУРА

- Новиков С. С., Рязанцев Ю. С. Акустическая проводимость жесткой горячей поверхности. ПМТФ, 1961, № 6.
- Зелдович Я. Б. Об устойчивости режима горения пороха в полузамкнутом объеме. ПМТФ, 1963, № 1.
- Харт Р., Макклур Ф. Взаимодействие акустических волн с поверхностью горения твердого топлива. Вопросы ракетной техники, 1960, № 2.