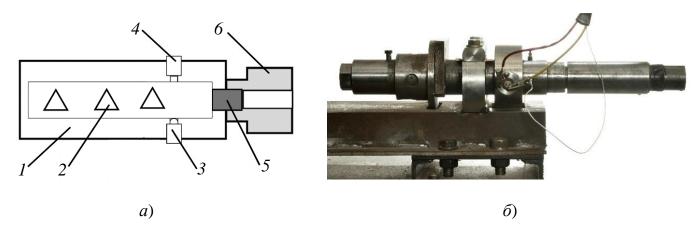


ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЗЕРНЕНОГО ЗАРЯДА В СОПЛОВОЙ МАНОМЕТРИЧЕСКОЙ БОМБЕ

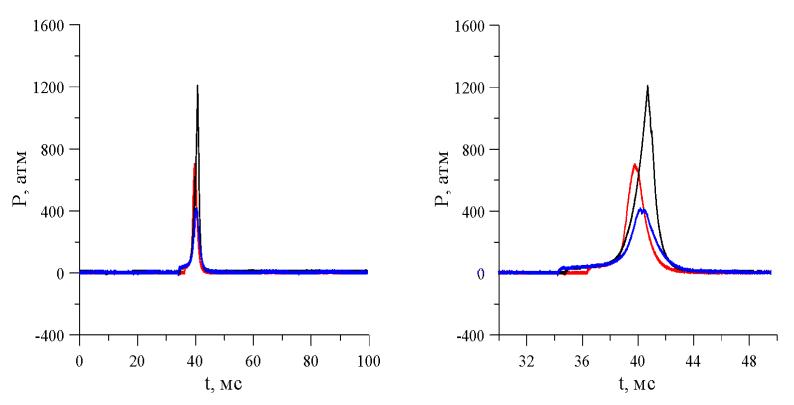
А. Н. ИЩЕНКО, А. Ю. КРАЙНОВ, К. С. РОГАЕВ, А. С. ДЬЯЧКОВСКИЙ

Экспериментальная установка



 $Puc.\ 1.$ Схема сопловой бомбы (a) и ее внешний вид (b). 1 — корпус, 2 — место расположения порохового заряда, 3 — датчик давления, 4 — воспламенительное устройство, 5 — сопло со снарядом-заглушкой, 6 — сопловой блок.

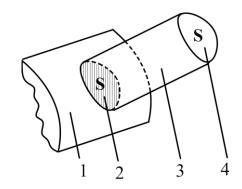
Результаты измерений



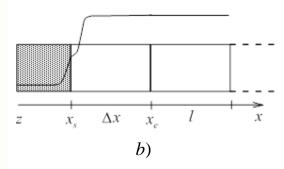
Измеренные зависимости изменения давления от времени в сопловой манометрической бомбе. Навеска 15 г.



Нестационарное горение пороха при изменении давления. Модель.



a)



Изображение объема над поверхностью зерна ВЭМ (a), области протекания моделируемых процессов (b).

1 – участок зерна ВЭМ, 2 – площадка на поверхности зерна ВЭМ, 3 – трубка тока продуктов сгорания ВЭМ, 4 – условная верхняя границы выделенной трубки тока

В системе координат, связанной с поверхностью твердого вещества, система уравнений математической модели запишется в виде:

Для конденсированной фазы, при $-\infty$ < x < x_s :

$$\rho_{1}c\left(\frac{\partial T_{1}}{\partial t}+u\frac{\partial T_{1}}{\partial x}\right)=\lambda_{1}\frac{\partial^{2} T_{1}}{\partial x^{2}}+Q_{1}k_{1}\rho_{1}(1-\eta)e^{-\frac{E_{1}}{RT_{1}}},$$
(1)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = k_1 (1 - \eta) e^{-\frac{E_1}{RT_1}},\tag{2}$$

Для газовой фазы, при $x_s < x < \infty$:

$$\rho_2 c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{dp}{dt} + Q_2 k_2 \rho_2 Y e^{-\frac{E_2}{RT}}, \tag{3}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + v \frac{\partial Y}{\partial x} = D \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} - k_2 Y e^{-\frac{E_2}{RT}},\tag{4}$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 v}{\partial x} = 0, \tag{5}$$

$$\rho_2 = \frac{p\mu}{RT}.\tag{6}$$



Нестационарное горение пороха Н при изменении давления. Модель.

Граничные условия:

$$\lambda_{1} \frac{\partial T_{1}(x_{s},t)}{\partial x} = \lambda_{2} \frac{\partial T(x_{s},t)}{\partial x}, \quad T_{1}(x_{s},t) = T(x_{s},t),$$

$$\frac{\partial T_{1}(-\infty,t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T(\infty,t)}{\partial x} = 0,$$

$$\rho_{1}u = \rho_{2}(x_{s},t)v(x_{s},t),$$

$$\rho_{1}u\beta = \rho_{2}(x_{s},t)v(x_{s},t)Y(x_{s},t) - D\rho_{2}(x_{s},t)\frac{\partial Y(x_{s},t)}{\partial x},$$

$$\frac{\partial Y(\infty,t)}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial Y(\infty,t)}{\partial x} = 0,$$
(7)

Начальные условия:

Для
$$-\infty < x < x_s$$

$$T_1(x,0) = T_0, \quad \eta(x,0) = 0. \tag{8}$$
Для $x_s < x < \infty$.
$$T(x,0) = T_{ig}, \quad Y(x,0) = 0, \quad v(x,0) = 0, \quad p(0) = p_0, \quad \rho_2(x,0) = \frac{p_0 \mu}{RT}.$$



Нестационарное горение пороха при изменении давления. Модель.

$$\frac{d\rho_{\rm V}c_2T_{\rm V}l\cdot N}{dt} = G\cdot N\left(c_2T_{\rm e} + \frac{v_{\rm e}^2}{2}\right) - G_cc_2T_{\rm V},\tag{9}$$

$$\frac{d\rho_{v}l\cdot N}{dt} = G\cdot N - G_{c},\tag{10}$$

$$\frac{dl}{dt} = u \,, \tag{11}$$

$$\frac{dN}{dt} = -Z \frac{G_c}{\rho_V} \frac{N}{W_{kam}},\tag{12}$$

$$p(1-\alpha\rho_V) = \rho_V R_{\scriptscriptstyle o} T_{\scriptscriptstyle V},\tag{13}$$

с начальными условиями

$$p(0) = p_0, \rho_V(0) = \rho_{V,0}, l(0) = l_0, G = v_e \rho_e.$$

G – приход массы газа в секунду от горения одного зерна

 G_c – расход газа через сопло

Индексы: 1 – величины, относящиеся к конденсированной фазе, 2 – величины, относящиеся к газовой фазе, 0 – начальные условия.

Теплофизические и формально-кинетические параметры, принятые для расчета [13]: $c_1 = 1465 \, \text{Дж} / \left(\kappa z \cdot K\right)$,

$$\begin{split} & \rho_{\mathrm{l}} = 1600 \ \mathrm{ke} \ / \ \mathrm{M}^{3}, \qquad \lambda_{\mathrm{l}} = 0.25 \ \mathrm{Джc} \ / \left(\mathrm{M} \cdot \mathrm{c} \cdot \mathrm{K} \right), \qquad Q_{\mathrm{l}} = 556800 \ \mathrm{Джc} \ / \ \mathrm{ke} \ , \qquad k_{\mathrm{l}} = 5 \cdot 10^{8} \ 1 \ / \ \mathrm{c} \ , \qquad E_{\mathrm{l}} = 80000 \ \mathrm{Джc} \ / \ \mathrm{моль} \ , \\ & c_{2} = 1465 \ \mathrm{Джc} \ / \left(\mathrm{ke} \cdot \mathrm{K} \right), \quad \lambda_{2} = 0.066 \ \mathrm{Джc} \ / \left(\mathrm{M} \cdot \mathrm{c} \cdot \mathrm{K} \right), \quad Q_{2} = 2435300 \ \mathrm{Джc} \ / \ \mathrm{ke} \ , \quad k_{2} = 2.96 \cdot 10^{12} \ 1 \ / \ \mathrm{c} \ , \quad E_{2} = 220000 \ \mathrm{Джc} \ / \ \mathrm{моль} \ , \\ & \mu = 0.03143 \ \mathrm{ke} \ / \ \mathrm{моль} \ , \quad R = 8.31 \ \mathrm{Джc} \ / \left(\mathrm{моль} \cdot \mathrm{K} \right), \quad T_{\mathrm{l},0} = 293 \ \mathrm{K} \ . \end{split}$$

[13] Булгаков В.К., Липанов А.М. Теория эрозионного горения твердых ракетных топлив. – М.: Наука, 2001. 138 с.



Нестационарное горение пороха при изменении давления. Модель.

$$W\frac{d}{dt}(\rho\varphi) = G - G_c, \qquad (14)$$

$$W\frac{d}{dt}(\rho\varphi E) = QG - G_c c_p T, \qquad (15)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{a_1}{e_1} p^{\nu},\tag{16}$$

$$p\left(\frac{1}{\rho} - \alpha\right) = RT,\tag{17}$$

где:

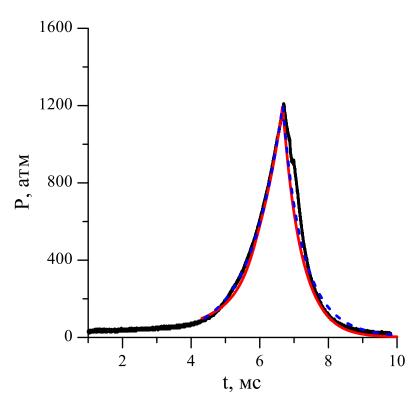
$$E = p \left(\frac{1}{\rho} - \alpha\right) \frac{1}{k-1}, \ \varphi = 1 - \frac{N}{W} \Lambda_0 \left(1 - \psi(z)\right), \ \psi(z) = \chi_f z \left(1 + \lambda_f z + \mu_f z^2\right),$$
$$\sigma(z) = 1 + 2\lambda_f z + 3\mu_f z^2, \ G = N\sigma(z) S_0 \delta a_1 p^v, \ N = \frac{m_{zar}}{\delta \Lambda_0}.$$

Начальные условия для системы уравнений в области W определяются из условия достижения в МБ давления 10 МПа за счет частичного выгорания зерен заряда к моменту времени t_0 .

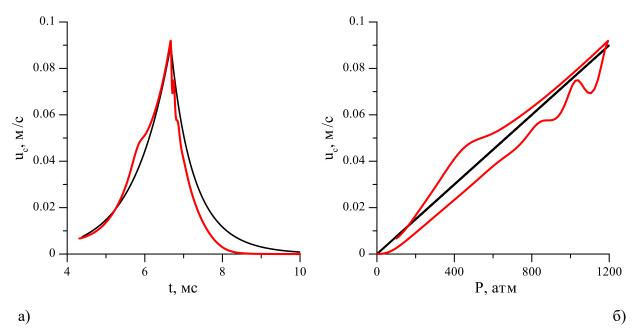
$$z(t_0) = z_0, \ p(t_0) = 10 \text{ M}\Pi \text{a}, \ T(t_0) = T_0.$$
 (18)

Расчеты проводились при следующих значениях величин: $\delta=1600$ кг/м³, $f=9.96\cdot10^5$ Дж/кг, $\alpha=1.034\cdot10^{-3}$ м³/кг, $e_1=1.5\cdot10^{-4}$ м, $I_k=\frac{e_1}{a_1}=2\cdot10^5$ Па·с, $a_1=\frac{e_1}{I_k}$ м/(Па·с), $Q=\frac{f}{\gamma-1}$, $\nu=1$, $\gamma=c_p/c_\nu=1.235$, $c_\nu=1502$ Дж/(кг·К), $R=c_p-c_\nu$ Дж/(кг·К), $\chi_f=1.1777$, $\lambda_f=-0.1509$, $\mu_f=0$, $W=1.65\cdot10^{-4}$ м³, $\Lambda_0=7.159\cdot10^{-10}$ м³, $S_0=5.621\cdot10^{-6}$ м², $\psi\left(t_0\right)=\frac{\delta/\Delta-1}{f\,\delta/p\left(t_0\right)+\alpha\Delta-1}$, $\Delta=m_{zar}/W$, $z_0=\psi\left(t_0\right)/\chi_f$.

Горение в сопловой БПО

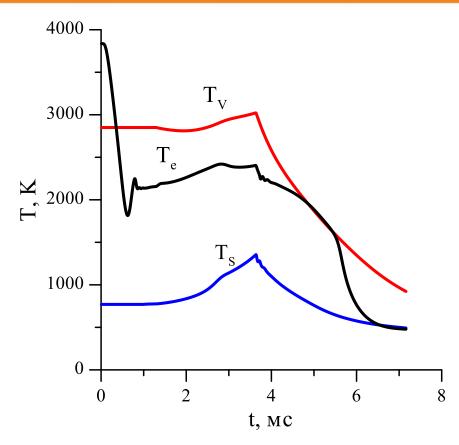


Зависимость давления от времени в СБ. Сплошная черная кривая — экспериментальные измерения, синяя пунктирная — расчет по термодинамической модели с использованием эмпирической формулы скорости горения от давления, красная сплошная — расчет по термодинамической модели с использованием модели нестационарного горения ВЭМ.



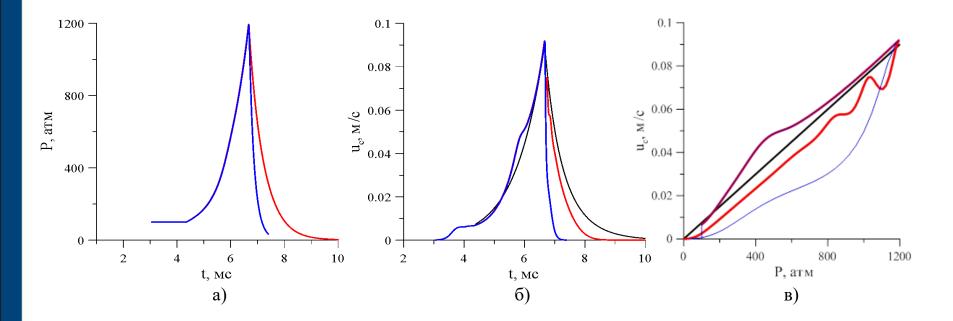
Зависимость скорости горения ВЭМ от времени (а) и от мгновенного значения давления в камере СБ (б). Черная кривая — расчет по термодинамической модели с использованием эмпирической формулы скорости горения от давления, красная — расчет по термодинамической модели с использованием модели нестационарного горения ВЭМ.

Горение в сопловой БПО



Зависимость температуры поверхности пороха (синяя линия), температуры продуктов горения пороха, оттекающих от поверхности топлива (черная линия), температура продуктов горения в камере сгорания сопловой бомбы (красная линия)

Горение в сопловой БПО



Зависимость давления от времени в СБ (а), скорости горения от времени (б), скорости горения от мгновенного значения давления (в).

Красные линии – зерна заряда не покидают камеру сгорания.

Синие линии – зерна заряда вытекают через сопло с газом в соответствии с их объемной концентрацией в камере сгорания

Получено удовлетворительное согласие результатов расчетов с экспериментальными измерениями.

Выявлено, что нестационарная скорость горения пироксилинового пороха, обусловленная большой скоростью роста давления над поверхностью горения, превышает квазистационарную скорость [4]. Это отличие зависит от скорости роста давления и от его абсолютной величины. Отличие квазистационарной и нестационарной скорости горения уменьшается при возрастании давления начиная от 80 МПа.

На этапе падения давления нестационарная скорость горения пороха существенно ниже скорости горения, определяемой эмпирическим степенным законом скорости горения пороха.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 24-21-00071.

Спасибо за внимание

