

УДК 536.46+536.24

DOI 10.17223/19988621/59/10

В.А. Порязов, А.Ю. Крайнов**РАСЧЕТ РЕЖИМОВ ЗАЖИГАНИЯ И ВЫХОДА
НА СТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ ГОРЕНИЯ
МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ¹**

Представлена физико-математическая модель и результаты расчета зажигания и выхода на стационарный режим горения металлизированного твердого топлива под действием внешнего теплового потока. На поверхности топлива ставятся граничные условия сохранения потоков энергии и массы компонентов, под поверхность твердого топлива записываются уравнения переноса тепла и разложения конденсированной фазы, над поверхностью твердого топлива записывается двухскоростная, двухтемпературная модель реагирующего течения продуктов его разложения и газификации над поверхностью твердого топлива. Исследовано влияние мощности и времени воздействия теплового потока, массовой доли, дисперсности частиц металла в составе твердого топлива на характеристики зажигания.

Ключевые слова: *металлизированное твердое топливо, математическая модель, зажигание, переходные процессы.*

Изучению физико-химических процессов, протекающих при зажигании и горении высокоэнергетических материалов, посвящено много теоретических и экспериментальных работ [1–7]. Это объясняется высокой практической значимостью результатов подобных исследований. Одной из основных задач до настоящего времени остается определение условий гарантированного зажигания, т.е. устойчивости переходного процесса, когда стадия зажигания сменяется стационарным самоподдерживающимся горением вещества без подвода дополнительной энергии от внешнего источника. Реализация таких режимов возможна при различных способах зажигания. Широко распространены конвективные [2] (высокотемпературные газы), радиационные [3–6] (импульс излучения) и кондуктивные [7] (разогретые пластины, частицы) способы передачи энергии поверхностному слою твердого топлива. Большой вклад в развитие теории зажигания конденсированных веществ внесли работы профессора ТГУ В.Н. Вилюнова [1, 4] и лаборатории горения конденсированных веществ Института химической кинетики и горения СО РАН под руководством В.Е. Зарко [2, 3]. Подходы, заложенные В.Н. Вилюновым в области решения задач зажигания конденсированных веществ, получили развитие в работах Р.С. Буркиной [5] и А.Г. Князевой [6]. Большая работа по изучению зажигания конденсированных веществ локальными источниками ограниченной энергоемкости проводится сотрудниками Томского политехнического университета [7]. Все современные смесевые твердые топлива в своем составе содержат добавки порошков металлов, которые добавляются для повышения теплоты сгорания топлива. Актуальным является вопрос о влиянии добавок порошков

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-38-00533 мол_а.

металла в состав твердого топлива на характеристики зажигания и горения. Анализ современного состояния исследований в области зажигания конденсированных высокоэнергетических веществ показывает, что это направление является актуальной научной задачей, требующей дальнейшего развития. В частности, большинство моделей зажигания конденсированных высокоэнергетических веществ не учитывает вклад двухфазных продуктов разложения металлизированного твердого топлива с учетом химического реагирования и межфазного взаимодействия (обмен энергией, массой и импульсом между фазами – газом и частицами) над поверхностью твердого топлива на характеристики зажигания и горения.

Постановка задачи

Рассматриваются одномерные нестационарные процессы при зажигании и горении металлизированного твердого топлива. Предполагается, что в твердом топливе при нагреве идут химические реакции, полупродуктами которых является газ. Газообразные продукты разложения высвобождаются на последней стадии реакции по достижении глубины превращения 0.99. Предполагается первый порядок реакции и зависимость ее скорости от температуры по закону Аррениуса. Теплофизические характеристики твердой фазы (плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности) не зависят от температуры и определяются компонентным составом твердого топлива путем осреднения аналогично [8]. Предполагается, что газовой фазе протекает экзотермическая химическая реакция первого порядка по закону Аррениуса, конвекция и диффузия реагентов. Величина давления над поверхностью горящего твердого топлива не зависит от координаты. Учитывается расширение газа при его нагреве, параметры состояния газа подчиняются уравнению состояния идеального газа. Предполагается, что частицы алюминия в составе твердого топлива представляют собой шарики, равномерно распределенные в объеме топлива, их размер равен размеру частиц алюминия, вылетающих в газовую фазу с поверхности горения. Процессы агломерации порошка алюминия на поверхности горения не рассматриваются. Воспламенение частиц алюминия происходит при достижении частицей заданной температуры, горение частиц алюминия описывается согласно экспериментальным данным. Теплообмен между частицами и газом происходит по закону Ньютона, движение частиц определяется действием сил трения со стороны газа. Из-за малой объемной концентрации частиц в газе влиянием движения частиц на движение газа пренебрегается, не учитывается взаимодействие частиц друг с другом в газовой фазе. Модель строится на основе модели нестационарного горения металлизированного твердого топлива, представленной в работе [9].

Математическая модель зажигания и горения металлизированного твердого топлива в системе координат, связанной с поверхностью твердого вещества, запишется следующим образом:

Для твердого топлива, при $-\infty < x < x_s$:

$$c_1 \rho_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} + u \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + Q_1 k_1 \rho_1 (1 - \eta) \exp \left(-\frac{E_1}{RT_1} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = k_1 (1 - \eta) \exp \left(-\frac{E_1}{RT_1} \right). \quad (2)$$

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

$$c_2 \rho_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} + V \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2(T_2) \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) + Q_2 k_2 \rho_2 Y \exp \left(-\frac{E_2}{RT_2} \right) + 4\pi \alpha r_3^2 n(T_3 - T_2) ; \quad (3)$$

$$c_3 \rho_3 \left(\frac{\partial T_3}{\partial t} + w \frac{\partial T_3}{\partial x} \right) = -4\pi \alpha r_k^2 n(T_3 - T_2) + \frac{2\mu_{Al}}{3\mu_o} G Q_{Al} ; \quad (4)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + v \frac{\partial Y}{\partial x} = D \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} - k_2 Y \exp \left(-\frac{E_2}{RT_2} \right) ; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 v}{\partial x} = -G ; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_3 w)}{\partial x} = G ; \quad (7)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial x} = -\tau_{fr} ; \quad (8)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial (nw)}{\partial x} = 0 ; \quad (9)$$

$$p = \frac{R}{\mu} \rho_2 T . \quad (10)$$

Граничные условия:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(x_s, t)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x_s, t)}{\partial x} + q(t), \quad T_1(x_s, t) = T_2(x_s, t),$$

$$T_3(x_s, t) = T_1(x_s, t), \quad n(x_s, t) = \frac{\rho_3(x_s, t)}{4/3 \pi r_{Al,0}^3 \rho_k}, \quad \alpha_{Al} \rho_1 u = \rho_3 w(x_s, t), \quad (11)$$

$$(1 - \alpha_{Al}) \rho_1 u = \rho_2(x_s, t) v(x_s, t), \quad \rho_2(x_s, t) = p \mu / R T_2(x_s, t),$$

$$(1 - \alpha_{Al}) \rho_1 u = (\rho_2 v Y)|_{(x_s, t)} - D \rho_2(x_s, t) \frac{\partial Y(x_s, t)}{\partial x},$$

$$\frac{\partial T_1(-\infty, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T_2(\infty, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial Y(\infty, t)}{\partial x} = 0.$$

Начальные условия:

Для $-\infty < x < x_s$:

$$T_1(x, 0) = T_0, \quad \eta(x, 0) = 0.$$

Для $x_s < x < \infty$:

$$T_2(x, 0) = T_0, \quad T_3(x, 0) = T_0, \quad Y(x, 0) = 0,$$

$$V(x, 0) = 0, \quad W(x, 0) = 0, \quad n(x, 0) = 0, \quad (12)$$

$$p(0) = p_0, \quad \rho_2(x, 0) = p_n \mu / R T_{ig}, \quad \rho_3(x, 0) = 0.$$

В системе (1) – (10): (1) – уравнение переноса тепла в твердом топливе; (2) – уравнение глубины разложения твердого топлива; (3), (4) – уравнения энергии для газовой фазы и частиц алюминия; (5) – уравнение выгорания окислителя в газовой фазе; (6) – уравнение сохранения массы газовой фазы; (7) – уравнение сохранения массы частиц; (8) – уравнение движения частиц; (9) – уравнение числа частиц в единице объема, (10) – уравнение состояния идеального газа.

Принятые обозначения: t – время; x – координата; x_s – координата положения поверхности горения; $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_{Al}, \rho_k$ – плотность твердого топлива, газа, приведенная плотность частиц (масса частиц в единице объема), алюминия, вещества частицы; T_1, T_2, T_3 – температура в твердом топливе, газовой фазы, частиц в газовой фазе; T_0 – начальная температура в твердом топливе, в газовой фазе над поверхностью твердого топлива; η – глубина превращения твердого топлива; u – линейная скорость горения твердого топлива; v, w – скорость газа и частиц; n – число частиц в единице объема; r_3, r_{Al} – радиус частицы, радиус не сгоревшего алюминия в частице; c_1, c_2, c_3 – удельная теплоемкость твердого топлива, газа при постоянном давлении, частиц; λ – коэффициент теплопроводности; Q_2 – тепловой эффект реакции в газовой фазе; Q_{Al} – эффективная теплота сгорания алюминия; k – предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса; E – энергия активации химической реакции; R – универсальная газовая постоянная; α_{Al} – массовая доля алюминия в составе топлива смесового твердого топлива; p – давление; p_0, p_k – начальное и конечное давление при его изменении над поверхностью горения; t_q – момент времени отключения теплового потока к поверхности топлива; Y – концентрация окислителя в газовой фазе; D – коэффициент диффузии; μ, μ_{Al}, μ_O – средняя молярная масса газовой фазы, молекул алюминия и кислорода; G – скорость изменения массы частиц при их горении; τ_{fr} – сила трения при движении частиц в газе; α – коэффициент теплоотдачи. Индексы: 1 – конденсированная фаза (металлизированное твердое топливо), 2 – газовая фаза, 3 – частицы.

Выражения, применяемые для вычисления силы взаимодействия частиц с газом, коэффициентов сопротивления и теплоотдачи, скорости изменения массы частиц алюминия, а также уравнения, определяющие текущие значения размеров частиц и алюминия в частице описаны в работе [9].

Изменение мощности теплового потока моделируется линейным во времени изменением от величины q_0 в заданный момент времени t_q до величины $q = 0$ в заданный момент времени.

Методика решения системы уравнений

Система уравнений (1) – (10), с краевыми (11) и начальными (12) условиями, выражениями для вычисления правых частей (13) – (18) описывает процесс зажигания и выхода на стационарный режим горения металлизированного твердого топлива.

В период зажигания предполагается, что скорость движения границы фаз (поверхности горения) $u = 0$ до момента достижения глубины превращения к-фазы на поверхности топлива значения равного $\eta = 0.99$.

До момента достижения глубины превращения к-фазы на поверхности топлива значения $\eta = 0.99$ тепло, приходящее от теплового источника воспламенения на поверхность топлива, распределяется между твердым топливом и газовой фазой. В твердом топливе перенос тепла от поверхности осуществляется только за счет кондуктивного механизма теплопереноса. В газовой фазе перенос тепла от по-

верхности твердого топлива осуществляется за счет кондуктивного и конвективного механизмов теплопереноса. Конвекция возникает из-за теплового расширения газа, находящегося в изобарических условиях.

После достижения глубины превращения k -фазы на поверхности топлива значения $\eta = 0.99$ начинается движение границы раздела фаз (поверхности топлива). При этом в газовую фазу над поверхностью топлива начинается приход продуктов газификации твердого топлива и частиц алюминия. В газовой фазе постепенно развиваются реакции в газовой фазе, разогрев частиц алюминия до температуры воспламенения и их последующее горение.

Линейная скорость горения, u , которая в системе координат, связанной с поверхностью горения, одновременно является скоростью движения металлизированного твердого топлива, определялась из уравнения (2) при значениях температуры на n -м временном слое. За линейную скорость горения принималась скорость движения изолинии глубины превращения твердого топлива $\eta = 0.99$, по достижении которой твердое топливо полностью газифицируется. Величина u определяется итерационным путем, путем подбора значения u , при котором глубина превращения твердого топлива $\eta = 0.99$ достигается на границе раздела твердое топливо – газ.

Далее на $(n+1)$ -м временном слое с использованием граничных условий (11) вычисляются: температура твердого топлива и газа из уравнений (1) и (3); выгорание окислителя в газовой фазе из уравнения (4); плотность газа из уравнения (10) при заданном давлении над поверхностью горения; скорость газа из (6); температура частиц из (4); скорость движения частиц из (8); количество частиц в единице объема из (9); распределенная плотность частиц из (7). Счет шага по времени повторяется заданное количество раз. Расчеты проводились до установления стационарного распределения параметров в твердом топливе и в газодисперсной среде над поверхностью горения. Для устойчивости численного решения шаг по времени вычисляется из условия $\Delta t < \Delta x / \max[v_i]$, где Δt , Δx – величины шагов по времени и пространству; v_i – величина скорости в точках разностной сетки.

Расчеты проводились для значений теплофизических и формально-кинетических параметров, характерных для пороха Н [10]:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0.25 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \lambda_{2,0} = 0.066 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, Q_1 = 556800 \text{ Дж/кг}, \\ Q_2 &= 2435300 \text{ Дж/кг}, Q_{Al} = 36.51 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}, E_1 = 80000 \text{ Дж/моль}, \\ E_2 &= 186107 \text{ Дж/моль}, k_1 = 2 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}, k_2 = 3.92 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}, k_{Al} = 2.22 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{1.5}/\text{с}, \\ a &= 0.5, c_1 = 1465 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, c_2 = 1466 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, c_3 = 760 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \\ \rho_1 &= 1600 \text{ кг/м}^3, \rho_k = 2600 \text{ кг/м}^3, \rho_{Al} = 2600 \text{ кг/м}^3, R = 8.31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}, \\ T_0 &= 293 \text{ К}, T_{ig} = 1300 \text{ К}. \end{aligned}$$

Коэффициент диффузии вычисляется через число Льюиса: $D_2 = Le \lambda_2 / (c_2 \rho_2)$, число Льюиса принято $Le = 1$. Температура воспламенения частиц алюминия принята равной 1300 К.

Результаты расчетов

На рис. 1 представлено изменение скорости горения пороха Н с добавлением порошка алюминия $\alpha_{Al} = 0.09$ и $r_{Al,0} = 3$ мкм во времени.

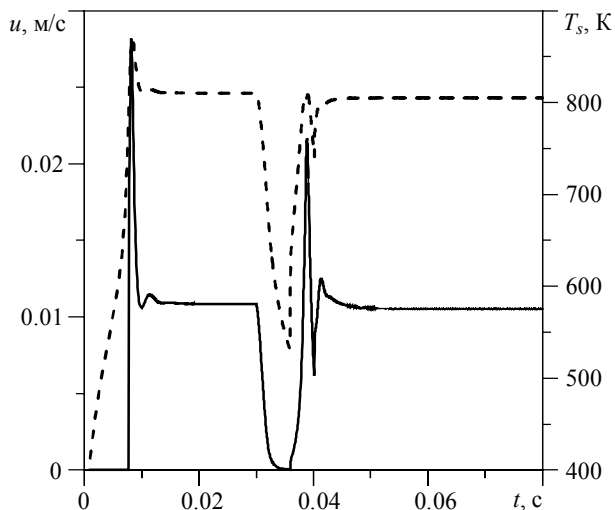


Рис. 1. Зависимость скорости горения и температуры поверхности пороха Н от времени.

$$r_{\text{Al},0} = 3 \text{ мкм}, \alpha_{\text{Al}} = 0.09, P = 10 \text{ МПа}, q = 3 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2, t_q = 0.03 \text{ с}$$

Fig. 1. Combustion rate and surface temperature of the powder N as a function of time:

$$r_{\text{Al},0} = 3 \text{ }\mu\text{m}, \alpha_{\text{Al}} = 0.09, P = 10 \text{ MPa}, q = 3 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2, \text{ and } t_q = 0.03 \text{ s}$$

Видно, что под действием теплового потока $q = 3 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ при $t_q = 0.03 \text{ с}$, твердое топливо проходит стадии:

- «инертного прогрева» и начала газификации твердого топлива (рис. 2);
- выхода на стационарный режим горения под действием внешнего теплового потока, при этом процессы в газовой фазе сопровождаются тепловым взрывом продуктов газификации твердого топлива, прогревом частиц алюминия до температуры их воспламенения и их последующим горением (рис. 3);
- «индукционного периода», который длится с момента отключения теплового потока до выхода на стационарный режим горения за счет теплового потока из газа к поверхности твердого топлива и стационарный режим горения при заданном давлении (рис. 4).

Практический интерес представляет исследование вопроса о влиянии мощности теплового потока на временные характеристики процесса зажигания и выхода на стационарный режим горения. На рис. 5 представлена зависимость скорости горения пороха Н с добавлением порошка алюминия с массовой долей алюминия в составе топлива $\alpha_{\text{Al}} = 0.09$ и радиусом частиц $r_{\text{Al},0} = 3 \text{ мкм}$ от времени при различных значениях мощности теплового потока. Видно, что с ростом мощности теплового потока период инертного прогрева сокращается, а скорость горения под воздействием внешнего теплового потока уменьшается. При этом «индукционный период» существенно не меняется.

При этом, как видно из рис. 6, при уменьшении α_{Al} до величины меньше 9 % для заданных величины и времени воздействия теплового потока выхода на стационарный режим горения после отключения не происходит. Это показывает, что добавки порошкообразных металлов в состав твердого топлива вносят существенный вклад в характеристики зажигания и горения.

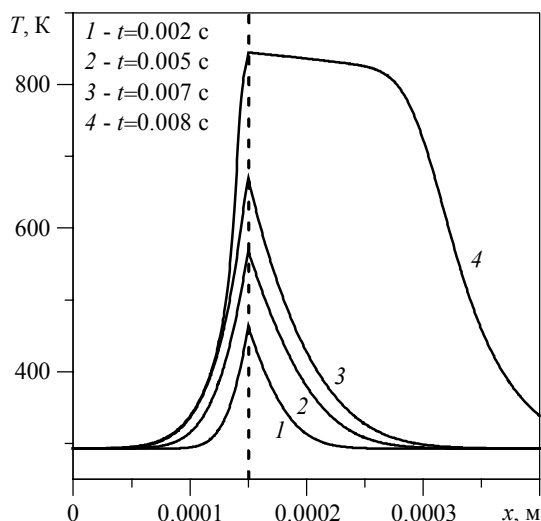


Рис. 2. Распределение температуры металлизированного твердого топлива и газа на этапе инертного прогрева в различные моменты времени.

$r_{Al,0} = 3 \text{ мкм}$, $\alpha_{Al} = 0.09$, $P = 10 \text{ МПа}$, $q = 3 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, $t_q = 0.03 \text{ с}$

Fig. 2. Distribution of the temperature of a metallized solid propellant and gas at the inert heating stage at various time instants:

$r_{Al,0} = 3 \text{ }\mu\text{m}$, $\alpha_{Al} = 0.09$, $P = 10 \text{ МПа}$, $q = 3 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$, and $t_q = 0.03 \text{ s}$

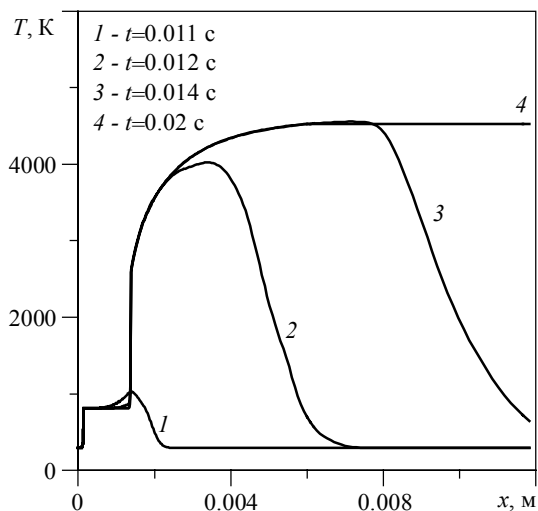


Рис. 3. Распределение температуры металлизированного твердого топлива и газа в процессе развития теплового взрыва в газовой фазе в различные моменты времени.

$r_{Al,0} = 3 \text{ мкм}$, $\alpha_{Al} = 0.09$, $P = 10 \text{ МПа}$, $q = 3 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, $t_q = 0.03 \text{ с}$

Fig. 3. Distribution of the temperature of a metallized solid propellant and gas at thermal explosion development in a gas phase at various time instants:

$r_{Al,0} = 3 \text{ }\mu\text{m}$, $\alpha_{Al} = 0.09$, $P = 10 \text{ МПа}$, $q = 3 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$, and $t_q = 0.03 \text{ s}$

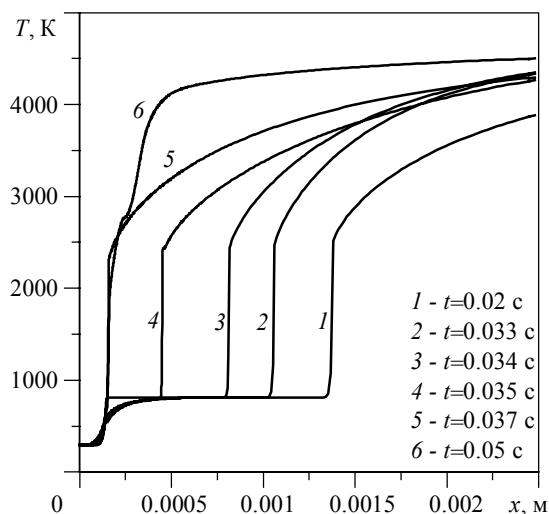


Рис. 4. Распределение температуры металлизированного твердого топлива и газа при отключении воздействия теплового потока и выходе на стационарный режим горения.

$$r_{Al,0} = 3 \text{ мкм}, \alpha_{Al} = 0.09, P = 10 \text{ МПа}, q = 3 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2, t_q = 0.03 \text{ с}$$

Fig. 4. Distribution of the temperature of a metallized solid propellant and gas when reaching a steady-state combustion after ceased heat flux:

$$r_{Al,0} = 3 \text{ }\mu\text{m}, \alpha_{Al} = 0.09, P = 10 \text{ MPa}, q = 3 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2, \text{ and } t_q = 0.03 \text{ s}$$

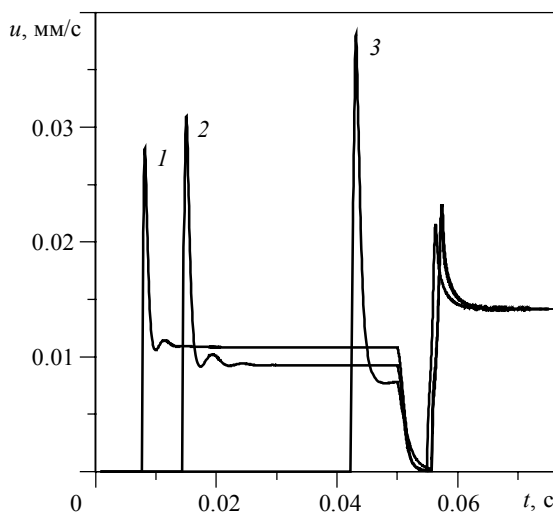


Рис. 5. Зависимость скорости горения пороха Н от времени. $r_{Al,0} = 3 \text{ мкм}, \alpha_{Al} = 0.09,$

$$P = 10 \text{ МПа}, 1 - q = 3 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2, 2 - q = 2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2, 3 - q = 1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$$

Fig. 5. Combustion rate of the powder N as a function of time at $r_{Al,0} = 3 \text{ }\mu\text{m}, \alpha_{Al} = 0.09,$

$$P = 10 \text{ MPa}, q = (1) 3 \cdot 10^6, (2) 2 \cdot 10^6, \text{ and } (3) 1 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$$

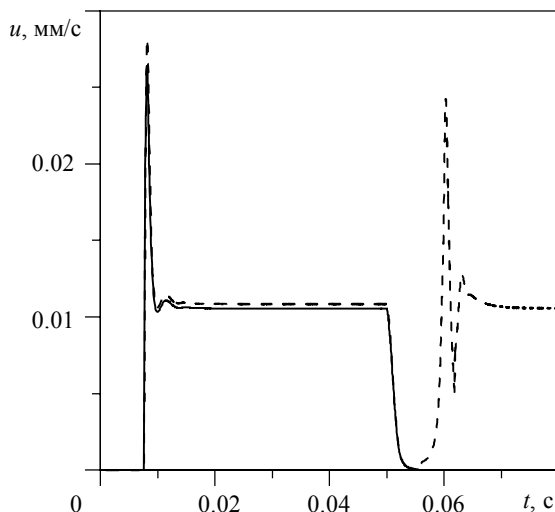


Рис. 6. Зависимость скорости горения пороха Н от времени. $r_{Al,0} = 3 \text{ мкм}$, $P = 10 \text{ МПа}$.

$\alpha_{Al} = 0.09$ – пунктирная линия, $\alpha_{Al} = 0.07$ – сплошная линия
(выход на стационарный режим горения не происходит)

Fig. 6. Combustion rate of the powder N as a function of time at $r_{Al,0} = 3 \text{ }\mu\text{m}$, $P = 10 \text{ MPa}$.

The dashed line indicates $\alpha_{Al} = 0.09$, the solid line, $\alpha_{Al} = 0.07$
(the steady-state combustion does not occur)

Также было замечено, что минимальное время воздействия теплового потока, необходимое для последующего выхода на стационарный режим горения, для каждой величины мощности теплового потока различное. С увеличением мощности теплового потока сокращается минимальное время необходимого воздействия теплового потока, требуемое для развития фронта химических реакций в газовой фазе, за исключением нескольких случаев, когда его мощность слишком велика. В некоторых режимах, при слишком долгом и мощном воздействии теплового потока выход на стационарный режим невозможен по причине большого удаления фронта химической реакции в газе от поверхности топлива за счет интенсивного оттока продуктов газификации твердого топлива. В этом случае тепловой взрыв и формирование фронта химической реакции происходит на значительном удалении от поверхности горения и вклад кондуктивного механизма теплообмена мал по сравнению с конвективным. При этом, при относительно низких значениях теплового потока, ситуация с формированием фронта химических реакций в газе носит аналогичный характер. Добавки порошка алюминия обеспечивают гарантированный выход на стационарный режим горения после отключения теплового потока, если в газовой фазе над поверхностью твердого топлива сформировался фронт химической реакции, обеспечивающий прогрев частиц алюминия до температуры воспламенения.

Аналогичные зависимости были получены при расчетах устойчивости горения при резком сбросе давления в работе [11]. Это подтверждает важность разработки моделей горения, учитывающих вклад процессов в газовой фазе, при изучении горении металлизированных твердых ракетных топлив.

Заключение

В работе представлены разработанная математическая модель, методика и результаты расчета задачи зажигания и выхода на стационарный режим горения металлizedованного твердого топлива. Проведен расчетно-теоретический анализ влияния добавок порошка алюминия на характеристики зажигания металлizedованных твердых топлив. Исследовано влияние мощности и времени теплового потока, массовой доли, дисперсности частиц металла в составе твердого топлива на характеристики зажигания и выхода на стационарный режим горения металлizedованного твердого топлива. Показано, что дисперсность порошка алюминия имеет существенное влияние на характеристики зажигания металлizedованных твердых топлив.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виллюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука, 1984. 190 с.
2. Зарко В.Е., Михеев В.Ф., Сухнин А.И., Хлевной С.С. Зажигание пороха горячим газом // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7. № 1. С. 64–67.
3. Гусаченко Л.К., Зарко В.Е., Рычков А.Д. Зажигание и гашение гомогенных энергетических материалов световым импульсом // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 1. С. 80–88.
4. Князева А.Г., Буркина Р.С., Виллюнов В.Н. Особенности очагового теплового воспламенения при различных начальных распределениях температуры // Физика горения и взрыва. 1988. № 3. С. 45–47.
5. Буркина Р.С., Домуховский А.М. Влияние структурных изменений приповерхностного слоя конденсированного вещества на его зажигание мощным импульсом излучения // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48. № 5. С. 122–129.
6. Князева А.Г. Приближенные оценки характеристик зажигания топлива лучистым потоком через преграду с различными свойствами // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32. № 1. С. 26–41.
7. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Об устойчивости зажигания смесового твердого топлива локальным источником ограниченной энергоёмкости // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50. № 6. С. 54–60.
8. Липанов А.М., Болкисев А.А. О расчете температурного поля в заряде твердого топлива с учетом гетерогенности его теплофизических свойств // Химическая физика и мезоскопия. 2013. Т. 14. № 3. С. 364–370.
9. Krainov A.Y., Poryazov V.A., Krainov D.A. Unsteady combustion modeling of metallized composite solid propellant // International Review on Modelling and Simulations. 2018. V. 11. No. 5. DOI: 10.15866/iremos.v11i5.15020.
10. Булгаков В.К., Липанов А.М. Теория эрозионного горения твердых ракетных топлив. М.: Наука, 2001. 138 с.
11. Порязов В.А., Крайнов А.Ю. Математическая модель и расчет нестационарной скорости горения металлizedованных твердых ракетных топлив // Вестн Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2017. № 50. С. 99–111.

Статья поступила 14.11.2018 г.

Poryazov V.A., Krainov A.Yu. CALCULATION OF THE IGNITION STAGES AND STEADY-STATE COMBUSTION OF A METALLIZED SOLID PROPELLANT UNDER LASER RADIATION. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 59. pp. 94–104

DOI 10.17223/19988621/59/10

Keywords: metallized solid propellant, mathematical model, ignition, transient phenomena.

The paper presents a physical and mathematical model as well as the results of the calculation of ignition and steady-state combustion of a metallized solid propellant under the action of heat flux. The approach is based on the coupled mathematical model which takes into account the physical and chemical processes in the solid propellant and in the gas phase over the propellant surface. The mass and energy flow conservation equations specify the boundary conditions on the surface of the solid propellant. The equations of heat transfer and decomposition of condensed phase are used below the surface of the propellant. The gas phase over the propellant surface is described by two-velocity and two-temperature model of the reacting flow of propellant decomposition products and their gasification.

The effect of the heat flux capacity, mass fraction and dispersion of the aluminum particles in the composition of solid propellant on the ignition characteristics and development of the steady-state combustion is studied.

PORYAZOV Vasily Andreevich (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: poryazov@ftf.tsu.ru

KRAINOV Aleksey Yur'evich (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

REFERENCES

1. Vilyunov V.N. (1984) *Teoriya zazhiganiya kondensirovannykh veshchestv* [Theory of ignition of condensed materials]. Moscow: Nauka.
2. Zarko V.E., Mikheev V.F., Sukhinin A.I., Khlevnoi S.S. (1973) Hot-gas ignition of powders. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 7(1). pp. 55–57. DOI: 10.1007/BF00748915.
3. Gusachenko L.K., Zarko V.E., Rychkov A.D. (2012) Ignition and extinction of homogeneous energetic materials by a light pulse. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 48(1). pp. 73–80. DOI: 10.1134/S0010508212010108.
4. Knyazeva A.G., Burkina R.S., Vilyunov V.N. (1988) Characteristics of local thermal ignition with various initial temperature distributions. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 24(3). pp. 303–305. DOI: 10.1007/BF00750611.
5. Burkina R.S., Domukhovskii A.M. (2012) Effect of structural changes of the surface layer of a condensed material ignited by a powerful radiation pulse. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 48(5). pp. 602–608. DOI: 10.1134/S0010508212050115.
6. Knyazeva A.G. (1996) Approximate estimates of the characteristics of propellant ignition using radiant flux through shields with various properties. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 32(1). pp. 22–35. DOI: 10.1007/BF01992187.
7. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. (2014) Stability of composite solid propellant ignition by a local source of limited energy capacity. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 50(6). pp. 670–675. DOI: 10.1134/S0010508214060082.
8. Lipanov A.M., Bolkisev A.A. (2013) O raschete temperaturnogo polya v zaryade smesevogo tverdogo topliva s uchetom geterogennosti ego teplofizicheskikh svoystv [On calculation of a temperature field in a composite propellant charge considering heterogeneity of its thermo-physical properties]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. 14(3). pp. 364–370.
9. Krainov A.Yu., Poryazov V.A., Krainov D.A. (2018) Unsteady combustion modeling of metallized composite solid propellant. *International Review on Modelling and Simulations*. 11(5). DOI: 10.15866/iremos.v11i5.15020.
10. Bulgakov V.K., Lipanov A.M. (2001) *Teoriya erozionnogo goreniya tverdykh raketnykh topliv* [Theory of erosive combustion of solid rocket propellants]. Moscow: Nauka.
11. Poryazov V.A., Krainov A.Yu. (2017) Matematicheskaya model' i raschet nestatsionarnoy skorosti goreniya metallizirovannykh tverdykh raketnykh topliv [Mathematical model and calculation of the unsteady combustion rate of the metallized solid rocket propellants]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 50. pp. 99–111. DOI: 10.17223/19988621/50/9.

Received: November 14, 2018