

УДК 536.46+536.24

DOI 10.17223/19988621/45/9

В.А. Порязов, А.Ю. Крайнов**ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ ПРИ ПЕРЕГРУЗКАХ¹**

Представлена физико-математическая модель горения металлизированного твердого топлива при перегрузках, направленных по нормали к поверхности горения. Модель учитывает тепловой эффект разложения конденсированной фазы, конвекцию, диффузию, экзотермическую химическую реакцию в газовой фазе, нагрев и горение частиц алюминия в потоке газа, движение продуктов сгорания, скоростное отставание частиц от газа, влияние поля ускорений на движение частиц алюминия. Учитывается влияние размера и массовой доли в составе топлива вылетающих с поверхности горения частиц металла на скорость горения. Исследовано влияние размера вылетающих с поверхности горения частиц алюминия на линейную скорость горения при перегрузке.

Ключевые слова: *твердое топливо, скорость горения, перегрузки, частицы алюминия, газовая фаза.*

Впервые в отечественной научной литературе проблематика влияния положительных и отрицательных перегрузок на скорость горения конденсированных высокоэнергетических систем сформулирована в начале 60-х годов XX века. Исследователями было показано, что перегрузка, направленная по нормали к поверхности горения металлизированного твердого топлива, может увеличивать скорость горения.

Авторами [1] изучены закономерности горения поливинилнитрата под действием массовых сил в двух направлениях. В работе [2] предполагается, что скорость горения составов при перегрузках увеличивается за счет удержания у поверхности горения инерционными силами каких-либо конденсированных частиц. На основе экспериментальных данных предложена модель горения алюминизированных твердых топлив при перегрузках, теоретически показаны максимальное и минимальное увеличение скорости горения. Как показано в работе [3], перегрузки не влияют на скорость горения безметалльных составов, а отклик скорости горения металлизированных составов на рост перегрузки тем выше, чем крупнее частицы металла в его составе. Авторами [4] экспериментально и теоретически изучено горение алюминизированных составов. Измерены скорость горения, масса и состав образованного шлака. Предложена модель горения алюминизированных составов при перегрузках. Теоретически предсказаны максимальное и минимальное увеличение скорости горения и продолжительности переходного режима в зависимости от величины перегрузок и характеристик составов. В [5] представлено исследование влияния перегрузки на горение баллистических составов на основе нитроклечатки, нитроглицерина и диэтиленгликольдинитрата без добавления

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-03-02578 А.

порошков металла и с добавлением 15 % по массе частиц алюминия диаметром 4 мкм при перегрузках до 800g или добавками катализаторов. Показано, что под действием перегрузок, направленных по нормали к поверхности горения порохов с добавками катализаторов, происходит уменьшение эффективности их действия, вплоть до полного выключения катализатора. Отмечено, что поле перегрузок может существенно изменять закон горения таких составов. Авторами [6] изучено влияние перегрузок до 1000g на скорость горения СТГ на основе ПХА, содержащих до 80 % по массе порошка алюминия АСД-1. Показано, что перегрузка не влияет на величину скорости горения безметалльных составов. С ростом ускорений, направленных к поверхности топлива, скорость горения всех исследованных металлизированных составов повышалась. Показано, что увеличение массовой доли алюминия от 10 до 45 % приводит к уменьшению относительной величины роста скорости горения при перегрузках. Увеличение давления приводит к уменьшению относительной скорости горения для составов, содержащих более 45% по массе алюминия. Из теоретического анализа экспериментальных данных получено соотношение для оценки увеличения скорости горения. При экспериментальном исследовании горения баллистических порохов с добавлением окислов металлов [7] при перегрузках, превышающих 400g, обнаружено образование в порохе неразгорающих каналов, направленных в глубь заряда, предложен механизм описания данного явления.

В данной работе представлена математическая модель горения твердого топлива с добавлением порошка алюминия в поле перегрузок. В модели учитывается экзотермическая химическая реакция в газовой фазе, конвекция и диффузия реагента, нагрев, зажигание и горение частиц алюминия в потоке газа, движение продуктов сгорания, отставание скорости движения частиц от газа, влияние перегрузки на движение частиц алюминия. Горение частиц алюминия описывается на основе экспериментальных данных [8], а воспламенение частицы алюминия происходит при достижении ею определенной температуры. Математическая модель горения твердого топлива с добавлением порошка алюминия в поле ускорений строилась на основе моделей [9, 10].

Рассматриваемая математическая модель состоит из уравнений сохранения энергии газа и частиц алюминия, уравнений сохранения массы газа, массы частиц и числа частиц алюминия, уравнения выгорания реагента в газовой фазе, уравнения движения частиц в потоке газа и уравнения состояния газа. Система уравнений, записанная в системе координат, связанной с поверхностью горения, имеет вид

$$c_2 \rho_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} + u \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + Y \rho_2 k_0 Q_2 \exp \left(\frac{-E_2}{R_y T_2} \right) + 4\pi \alpha r_k^2 n (T_3 - T_2); \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial Y}{\partial t} + u \frac{\partial Y}{\partial x} \right) = D_2 \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} - Y k_0 \exp \left(\frac{-E_2}{R_y T_2} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_2 u)}{\partial x} = -G; \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_3 w)}{\partial x} = G; \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial x} = -\tau_{tr} - a; \quad (6)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial(nw)}{\partial x} = 0; \quad (7)$$

$$P = \rho_2 R T_2 = const. \quad (8)$$

В этой системе, (1) и (4) – уравнения энергии для газовой фазы и частиц, (2) – уравнение для глубины выгорания, (3) – уравнение сохранения массы газовой фазы, (5) – уравнение сохранения массы частиц, (6) – уравнение движения частиц, (7) – уравнение для числа частиц, (8) – уравнение состояния идеального газа.

Принятые обозначения: c – удельная теплоемкость; D – коэффициент диффузии; E_2 – энергия активации реакции в газовой фазе; G – скорость изменения массы частиц при их горении; k_0 – предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса; n – число частиц в единице объема; P – давление; Q_2 – тепловой эффект реакции в газовой фазе; Q_{Al} – теплота сгорания алюминия; r_k – размер частицы; R – газовая постоянная; R_y – универсальная газовая постоянная; T – температура; t – время; u – скорость газа; w – скорость частиц; x – координата; Y – концентрация горючего в газовой фазе; α – коэффициент теплоотдачи; λ – коэффициент теплопроводности; ρ_2 – плотность газа; ρ_3 – приведенная плотность частиц (масса частиц в единице объема); ρ_k – плотность частицы в потоке продуктов сгорания; μ_{Al} , μ_O – молярные массы молекул алюминия и кислорода; τ_{tr} – сила взаимодействия частиц с газом; a – величина перегрузки, направленной по нормали к поверхности горения α_{Al} – массовая доля порошка алюминия в составе топлива. Индексы: 1 – параметры топлива; 2 – параметры газовой фазы; 3 – параметры конденсированной фазы продуктов горения. Расчеты проводились при теплофизических характеристиках, соответствующих пороху Н:

$$c_1 = 1465 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad c_2 = 1466.5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad c_3 = 760 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$\lambda_2 = 1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \quad Q_1 = 556800 \text{ Дж}/\text{кг}, \quad Q_2 = 2435300 \text{ Дж}/\text{кг},$$

$$Q_{Al} = 36510000 \text{ Дж}/\text{кг}, \quad \rho_1 = 1600 \text{ кг}/\text{м}^3, \quad \rho_k = 2600 \text{ кг}/\text{м}^3,$$

$$\eta = 0.00005 \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad E_1 = 79733 \text{ Дж}/\text{моль}, \quad E_2 = 186107 \text{ Дж}/\text{моль},$$

$$R_y = 8.31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}), \quad R = 264.36 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad K_v = 8.46 \text{ м}/\text{с},$$

$$k_0 = 0.98 \cdot 10^{10} \text{ л}/\text{с}, \quad k_{Al} = 2.22 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{1.5}/\text{с}, \quad T_{1,0} = 293 \text{ К}, \quad \mu_{Al} = 0.027 \text{ кг}/\text{моль},$$

$$\mu_O = 0.016 \text{ кг}/\text{моль}, \quad D_2 = Le \cdot \lambda_2 / (c_2 \rho_2), \quad Le = 1.$$

Координата $x = 0$ соответствует поверхности горения. Согласно модели Беляева – Зельдовича, когда разложение пороха до газовой фазы рассматривается как брутто-реакция с тепловым эффектом Q_1 и энергией активации E_1 , линейная скорость горения, V_k , определяется температурой поверхности конденсированной фазы [11]:

$$V_k = K_v \exp\left(\frac{-E_1}{2R_y T_s}\right), \quad (9)$$

где K_v – эмпирическая константа; T_s – температура поверхности горения; E_1 – энергия активации реакции в конденсированной фазе.

На границе $x = 0$ граничные условия выражают законы сохранения массы и энергии:

$$\begin{aligned} (1 - \alpha_{Al})\rho_1 V_k &= \rho_2 u|_{x=0}, \quad \alpha_{Al}\rho_1 V_k = \rho_3 w|_{x=0}, \\ \rho_1 V_k Y &= D_2 \rho_2 \frac{\partial Y}{\partial x}\bigg|_{x=0} + \rho_2 u Y|_{x=0}, \\ \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=0} &= \rho_1 V_k (c_2 T_2|_{x=0} - Q_1 - c_1 T_{1,0}), \quad T_3|_{x=0} = T_2|_{x=0}, \\ \rho_2|_{x=0} &= \frac{P}{RT_2|_{x=0}}, \quad n|_{x=0} = \frac{\rho_3|_{x=0}}{(4/3)\pi r_{Al,0}^3 \rho_k}, \quad P = const. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $r_{Al,0}$ – радиус частицы алюминия, выходящей с поверхности горения пороха Н в газовый поток, $T_{1,0}$ – начальная температура пороха, $T_2|_{x=0} \equiv T_S$.

На границе $x = \infty$ ставятся следующие граничные условия:

$$\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=\infty} = 0, \quad \frac{\partial Y}{\partial x}\bigg|_{x=\infty} = 0. \quad (11)$$

Начальные условия имеют вид

$$\begin{aligned} T_2(x, 0) &= T_{ign}, \quad T_3(x, 0) = T_{ign}, \\ Y(x, 0) &= 0, \quad \rho_2(x, 0) = \frac{P}{RT_2(x, 0)}, \\ \rho_3(x, 0) &= 0, \quad w(x, 0) = 0, \quad n(x, 0) = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Сила взаимодействия частиц алюминия с газом вычисляется по формуле

$$\tau_{tr} = \frac{F_{tr}}{\frac{4}{3}\pi r_k^3 \rho_k}, \quad F_{tr} = C_R S_m \frac{\rho_2(w - u)|u - w|}{2}, \quad (13)$$

где S_m – площадь миделевого сечения; F_{tr} – сила сопротивления сферы при обтекании; C_R – коэффициент сопротивления.

Коэффициент сопротивления определяется как в [10] по эмпирической формуле:

$$C_R = \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,682}), \quad Re = \frac{2r_k \rho_2 |u - w|}{\eta},$$

где η – коэффициент динамической вязкости.

Коэффициент теплоотдачи определяется по формуле [12]

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_2}{2r_k}, \quad Nu = 2 + \sqrt{Nu_l^2 + Nu_t^2}, \quad (14)$$

где $Nu_l = 0,664 Re^{0,5}$, $Nu_t = 0,037 Re^{0,8}$, Nu – число Нуссельта.

Выражение для скорости изменения массы частиц при их горении определяется как в [10]:

$$G = \frac{3\mu_O}{2\mu_{Al}} n \rho_k 4\pi r_{Al}^{1,5} k_{Al} a_{ox}^{0,9}, \quad k_{Al} = 2,22 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{1,5}/\text{с}, \quad (15)$$

где a_{ox} – коэффициент избытка окислителя.

Размер оставшейся части алюминия в частице, r_{Al} , определяется из числа частиц в единице объема n и приведенной плотности частиц ρ_3 по формуле

$$r_{Al} = \left[\left(\left(1 + \frac{3\mu_O}{2\mu_{Al}} \right) r_{Al,0}^3 - \frac{\rho_3}{(4/3)\pi n \rho_k} \right) \frac{2\mu_{Al}}{3\mu_O} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (16)$$

Система уравнений (1) – (8) с граничными и начальными условиями (10) – (12) и выражениями (9), (13) – (16) решалась численно. Уравнения (1) и (2) – по неявной разностной схеме методом прогонки. Уравнения (3) – (7) – по явной разностной схеме с использованием аппроксимации конвективных слагаемых разностями против потока. Для устойчивости численного решения использовалось условие устойчивости вида $\Delta t < \Delta x / \max[u_i]$, где Δt – величина шага по времени, Δx – величина шага по пространству, u_i – величина скорости в точках разностной сетки.

Система уравнений (1) – (10) решалась в соответствии со следующим алгоритмом вычисления значений неизвестных на $n+1$ -м временном слое (счет шага по времени). По формуле (9) вычисляется скорость V_k . По уравнению (2), записанному в разностной форме, вычисляется выгорание горючего газовой фазы на $n+1$ -ом временном слое. По уравнению (1) вычисляется температура горючего газовой фазы на $n+1$ -ом временном слое. По уравнению (8) – плотность газа при заданном давлении над поверхностью горения, а по уравнению (3) – скорость газа, по уравнению (4) – температура частиц, по уравнению (6) – скорость движения частиц, по уравнению (7) – количество частиц в единице объема, по уравнению (5) – плотность частиц. С использованием разностной аппроксимации граничных условий (10) определяется температура поверхности пороха на новом временном слое и линейная скорость горения пороха. Счет шага по времени повторяется необходимое количество раз. Расчеты проводятся до установления стационарного распределения параметров газодисперсной среды над поверхностью горения пороха.

На рис. 1 представлена зависимость скорости горения пороха H от давления при массовой концентрации алюминия 9 % и различных значениях $r_{Al,0}$ в отсутствие перегрузки. Вид зависимости соответствует качественной зависимости, предсказанной А.Ф. Беляевым [13].

В рамках построенной модели проведено исследование влияния перегрузок в диапазоне от $-50g$ до $50g$, направленной по нормали к поверхности горения, на величину скорости горения пороха H с добавлением частиц алюминия радиусом от 1 до 30 мкм в диапазоне давлений 20 – 100 атм. Массовая концентрация алюминия в составе топлива задавалась равной 9 %. Результаты расчета зависимости скорости горения от перегрузки, направленной по нормали к поверхности горения представлены на рис. 2. Скорости горения представлены в виде зависимости безразмерной величины U от величины перегрузки a , где $U = V_k / V_{k,0}$, V_k – скорость горения при заданной величине перегрузки, а $V_{k,0}$ – скорость горения без перегрузки, рассчитанные для каждого значения величины давления и дисперсности частиц алюминия. Фактически, рис. 2 отражает относительный прирост скорости с ростом перегрузки для каждого состава при заданном давлении над поверхностью горения.

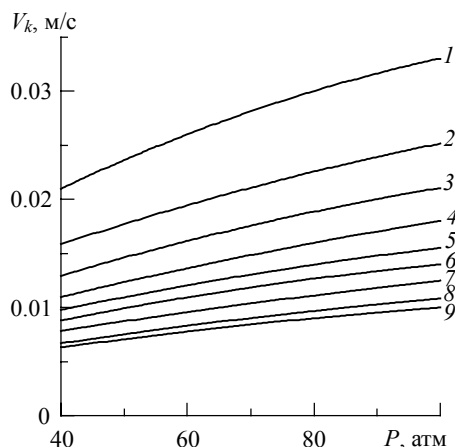


Рис. 1. Зависимость скорости горения пороха Н от давления в отсутствие перегрузок ($a = 0$). Массовая концентрация алюминия 9 %; $r_{Al,0}$, мкм: кр. 1 – 1, кр. 2 – 2, кр. 3 – 3, кр. 4 – 5, кр. 5 – 7, кр. 6 – 10, кр. 7 – 15, кр. 8 – 30, кр. 9 – 45

Fig. 1. The rate of powder combustion N as a function of pressure in the absence of acceleration loading ($a=0$). Aluminum mass concentration is 9 %. $r_{Al,0} = (1) 1, (2) 2, (3) 3, (4) 5, (5) 7, (6) 10, (7) 15, (8) 30, \text{ and } (9) 45 \mu\text{m}$

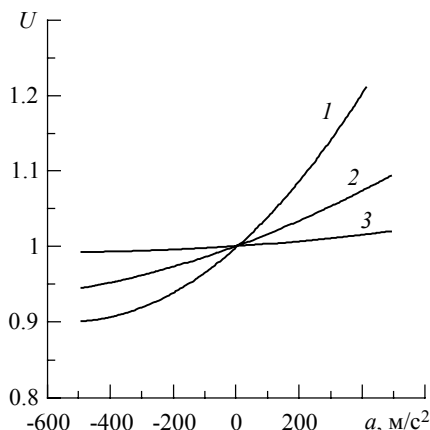


Рис. 2. Зависимость скорости горения пороха Н от перегрузки при различных значениях размера частиц алюминия $r_{Al,0}$, мкм: кр. 1 – 15, кр. 2 – 10, кр. 3 – 5; $P = 40$ атм

Fig. 2. The rate of powder combustion N as a function of the acceleration loading at different aluminum particle sizes: $r_{Al,0} = (1) 15, (2) 10, \text{ and } (3) 5 \mu\text{m}$. $P = 40 \text{ atm}$

Практический интерес представляет информация о росте скорости горения под действием перегрузки, направленной по нормали к поверхности горения, и влияние на этот эффект давления над поверхностью горения и массовой доли порошка алюминия в составе топлива.

Для каждого состава величина скорости горения изменяется тем сильнее, чем выше величина перегрузки. Видно (рис. 2), что чем больше размер частиц алюминия, вылетающих с поверхности горящего топлива, тем больше относительное изменение скорости горения от перегрузки.

Увеличение давления над поверхностью горения приводит к более существенному росту скорости горения при заданной величине перегрузки (рис. 3). Таким образом, отклик относительной скорости горения к росту перегрузки тем выше, чем выше давление над поверхностью горения. Увеличение массовой доли алюминия до 20 % в составе топлива приводит к увеличению скорости горения для одинаковых значений величины перегрузки (рис. 4).

В результате проведенного исследования показано, что скорость горения составов твердого топлива при перегрузках, направленных по нормали к поверхности горения, увеличивается за счет удержания вблизи поверхности горения инерционными силами частиц алюминия. С ростом величины перегрузки частицы алюминия, выходящие в газовый поток с поверхности пороха, достигают температуры начала их горения на меньшем расстоянии от поверхности горения, в связи с этим увеличивается температура газа вблизи поверхности пороха, что приводит к увеличению кондуктивного теплового потока к ней и, как следствие, к увеличению температуры поверхности пороха и линейной скорости его горения.

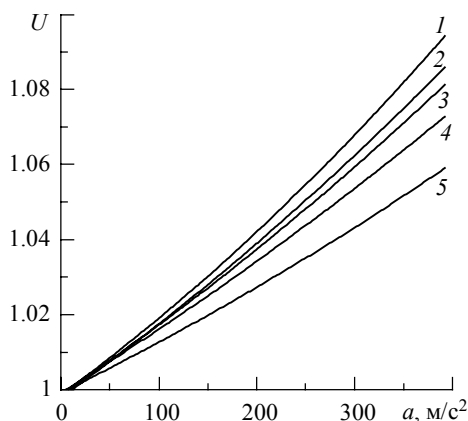


Рис. 3. Зависимость скорости горения пороха Н от перегрузки при различных давлениях P , атм: кр. 1 – 100, кр. 2 – 80, кр. 3 – 60, кр. 4 – 40, кр. 5 – 20; $r_{Al,0} = 10$ мкм

Fig. 3. The rate of N powder combustion as a function of acceleration loading at different pressure values: $P =$ (1) 100, (2) 80, (3) 60, (4) 40, and (5) 20 atm; $r_{Al,0} = 10$ μ m

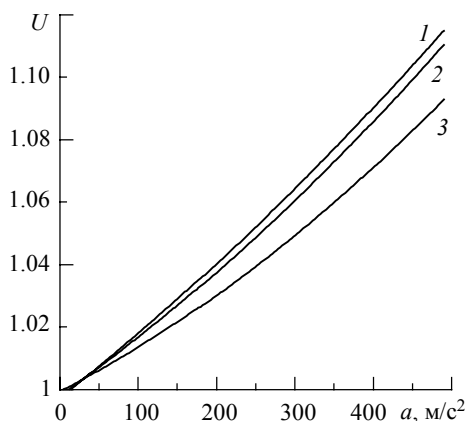


Рис. 4. Зависимость скорости горения пороха Н от перегрузки при различных значениях массовой доли частиц алюминия в составе топлива, $r_{Al,0} = 10$ мкм, $P = 80$ атм. Массовая доля алюминия в составе топлива: кр. 1 – 20 %, кр. 2 – 7 %, кр. 3 – 3 %

Fig. 4. The rate of powder combustion N as a function of acceleration loading for different aluminum mass fractions in the propellant. $r_{Al,0} = 10$ μ m, $P = 80$ atm. Aluminum mass fraction in the propellant is (1) 20%, (2) 7%, and (3) 3%

Полученные результаты зависимости скорости горения пороха Н с добавлением порошка алюминия в поле ускорений качественно согласуются с зависимостями, описанными в научной литературе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максимов Э.И., Максимов Ю.М., Мержанов А.Г. Исследование горения конденсированных веществ в поле массовых сил // Физика горения и взрыва. 1967. Т. 3. № 3. С. 323–327.
2. Орджоникидзе С.К., Марголин Д.А., Похил П.Ф., Уралов А.С. Горение алюминизированных конденсированных систем при перегрузках // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7. № 4. С. 536–544.
3. Максимов Ю.М., Максимов Э.И., Виллюнов В.Н. Влияние перегрузок на горение модельных смесевых металлизированных составов // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10. № 2. С. 169–177.
4. Марголин А.Д., Крупкин В.Г. Влияние конденсированных добавок на скорость горения пороха в поле ускорений // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11. № 5. С. 702–709.
5. Марголин А.Д., Крушин В.Г., Хубаев В.Г. и др. Закономерности горения баллиститных составов при перегрузках // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14. № 6. С. 29–36.
6. Марголин А.Д., Крупкин В.Г. Влияние перегрузок на скорость горения составов, содержащих до 80% алюминия // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14. № 3. С. 42–49.
7. Архипов В.А., Барсуков В.Д., Березиков А.П., Третьяков Н.С. Особенности горения конденсированных систем с катализаторами в условиях перегрузки // Хим. физика и мезоскопия. 2006. Т. 8. № 1. С. 43–51.
8. Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Коротков А.И. О горении и воспламенении частиц мелкодисперсного алюминия // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 4. № 3. С. 323–329.

9. Poryazov V.A., Krainov A.Yu., Krainov D.A. Simulating the combustion of n powder with added finely divided aluminum // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015. V. 88. No. 1. P. 94–103. DOI: 10.1007/s10891-015-1171-0.
10. Порязов В.А., Крайнов А.Ю. Математическое моделирование горения замороженной суспензии нанодисперсного алюминия // *Физика горения и взрыва*. 2016. Т. 52. № 2. С. 60–66.
11. Зельдович Я.Б. К теории горения порохов и взрывчатых веществ // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1942. Т. 12. С. 498–524. (В книге: Зельдович Я.Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. М.: Наука. 1984. 374 с.).
12. *Справочник по теплообменникам*: в 2 т. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1987.
13. Беляев А.Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М.: Наука, 1968.

Статья поступила 21.11.2016 г.

Poryazov V.A., Krainov A.Yu. (2017) COMBUSTION OF THE SOLID PROPELLANT WITH ADDITION OF ALUMINUM POWDER UNDER AN ACCELERATION LOAD. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 45. pp. 95–103

DOI 10.17223/19988621/45/9

The paper presents a physical-mathematical model for the metallized solid propellant combustion under an acceleration load directed normally to the burning surface. The model takes into account the thermal effect of decomposition of the condensed phase, convection, diffusion, the exothermic chemical reaction in a gas phase, heating and combustion of Al particles in the gas flow, the flow of combustion products, the velocity lag of the particles in relation to the gas, and the acceleration field effect on the motion of Al particles. The effect of the size and mass fraction of Al particles emitted from the burning surface on the combustion rate is also taken into consideration. The impact of the size of Al particles emitted from the burning surface, on the linear burning rate has been investigated under an acceleration load. The research results showed that the combustion rate increased with increasing acceleration load. It was also revealed that the larger the size of aluminum particles emitted from the burning surface, the higher the response of the combustion rate to the acceleration load. The results showed that increasing mass fraction of aluminum in the propellant composition led to an increase in the response of the relative combustion rate. It was also found that the relative combustion rate sensitivity increased with an increase in pressure above the burning surface. The results obtained are in a qualitative agreement with those described in the scientific literature.

Keywords: solid propellant, combustion rate, acceleration loading, aluminum particles, gas phase.

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

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

REFERENCES

1. Maksimov E.I., Maksimov Yu.M., Merganov A.G. (1967) Combustion of condensed substances in a mass force field. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 3(3). pp. 201–203. DOI: 10.1007/BF00791860.
2. Ordzhonikidze S.K., Margolin A.D., Pokhil P.F., Uralov A.S. (1971) Combustion of aluminized condensed systems under acceleration loading. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 7(4). pp. 458–464. DOI: 10.1007/BF00740676.

3. Maksimov Yu.M., Maksimov E.I., Vilyunov V.N. (1974) Effect of overcharges on the combustion of model mixed metallized compositions. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 10(2). pp. 146–153. DOI: 10.1007/BF01464168.
4. Margolin A.D., Krupkin V.G. (1975) Influence of condensed admixtures on the powder combustion rate in an acceleration field. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 11(5). pp. 600–605. DOI: 10.1007/BF00751082.
5. Margolin A.D., Krupkin V.G., Khubaev V.G. et al. (1978) Laws governing the combustion of ballistic compositions with overloads. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 14(6). pp. 716–722. DOI: 10.1007/BF00786099.
6. Margolin A.D., Krupkin V.G. (1975) Effect of overloads on the combustion rate of compositions containing up to 80% aluminum. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 11(5). pp. 600–605. DOI: 10.1007/BF00740493.
7. Arkhipov V.A., Barsukov V.D., Berezikov A.P., Tretyakov N.S. (2006) Osobennosti goreniya kondensirovannykh sistem s katalizatorami v usloviyakh peregruzki [Features of the condensed system combustion with catalysts under overload conditions]. *Khimicheskaya Fizika i Mezoskopiya – Chemical Physics and Mesoscopies*. 8(1). pp. 43–51.
8. Belyaev A.F., Frolov Yu.V., Korotkov A.I. (1968) Combustion and ignition of particles of finely dispersed aluminum. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 4(3). pp. 182–185. DOI: 10.1007/BF00750857.
9. Poryazov V.A., Krainov A.Yu., Krainov D.A. (2015) Simulating the combustion of n powder with added finely divided aluminum. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 88(1). pp. 94–103. DOI: 10.1007/s10891-015-1171-0.
10. Krainov A.Yu., Poryazov V.A. (2016) Mathematical modeling of combustion of a frozen suspension of nanosized aluminum. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 52(2). pp. 177–183. DOI: 10.1134/S0010508216020076.
11. Zel'dovich Ya.B. (1942) K teorii goreniya porokhov i vzryvchatykh veshchestv [On the theory of combustion of gunpowder and explosives]. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*. 12. pp. 498–524.
12. *Spravochnik po teploobmennikam* (1987) [Handbook of the heat exchangers]. V. 1. Moscow: Energoatomizdat.
13. Belyaev A.F. (1968) *Gorenie, detonatsiya i rabota vzryva kondensirovannykh sistem* [Burning, detonation, and explosion work of condensed systems]. Moscow: Nauka.