

В.А. Порязов**ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ
НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ
СМЕСЕВЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ¹**

Представлена физико-математическая модель горения смесового твердого топлива на основе перхлората аммония с добавлением частиц алюминия, учитывающая 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. Учитывается влияние размера и массовой доли вылетающих с поверхности горения частиц металла на скорость горения. Исследовано влияние размера вылетающих с поверхности горения частиц алюминия на линейную скорость горения.

Ключевые слова: *металлизированное твердое топливо, скорость горения, дисперсность частиц алюминия, газовая фаза*

Основой большинства современных моделей горения смесовых твердых топлив (СТТ) является модель Германса [1]. Применимость ее для проведения инженерных расчетов скорости горения СТТ, в частности моделирования эрозионного горения, продемонстрирована в работе [2].

Объектом исследования выбрано СТТ на основе перхлората аммония (ПХА) со связующим бутил-каучуком и добавлением частиц алюминия. Ставится задача исследовать общие закономерности влияния дисперсности частиц алюминия на скорость горения металлизированного СТТ.

Скорость горения смесового топлива рассчитывается как величина, определяемая массовыми потоками компонентов топлива с поверхности горения. Массовый поток компонентов топлива определяется тепловым балансом системы на поверхности топлива, складывающимся из теплового потока из газовой фазы и суммарным тепловыделением в к-фазе. Тепловыделение в к-фазе обусловлено экзотермическим процессом разложения окислителя и эндотермическим пиролизом связки. В газовой фазе протекает экзотермическая химическая реакция первого порядка по закону Аррениуса, конвекция и диффузия реагентов. Горение происходит в изобарических условиях, давление не зависит от координаты. Учитывается расширение газа при его нагревании. Частицы алюминия представляют собой шарики, размер частиц в составе топлива одинаков, распределение зерен перхлората аммония в объеме топлива равномерное, частицы алюминия равномерно распределены в связующем. Горение частиц алюминия описывается согласно экспериментальным данным [3]. Воспламенение частиц алюминия происходит при достижении температуры частицы равной заданной величине [3]. Теплообмен между частицами и газом происходит по закону Ньютона, движение частиц про-

¹ Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания № 10.1329.2014/К.

исходит под действием сил трения со стороны газа, из-за малой объемной концентрации частиц в газе влиянием движения частиц на движение газа пренебрегается. Не учитывается агломерация частиц на поверхности к-фазы, размер вылетающих с поверхности горения частиц соответствует размерам частиц в к-фазе. Не учитывается взаимодействие частиц друг с другом в газовой фазе.

Математическая постановка задачи состоит из уравнений для определения массовых потоков компонентов топлива, суммарного теплового эффекта в к-фазе, сохранения энергии газа и частиц алюминия, сохранения массы газа, массы частиц и числа частиц алюминия, выгорания реагента в газовой фазе, движения частиц в потоке газа, уравнения состояния газа [4]. Постановка для полидисперсного состава конденсированных продуктов горения в газовой фазе аналогична [5]:

$$c_2 \rho_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} + u \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + Y \rho_2 k_0 Q_2 \exp \left(\frac{-E_2}{R_y T_2} \right) + \sum_{i=1}^N 4\pi \alpha_i r_{k,i}^2 n_i (T_{3,i} - T_2); \quad (1)$$

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

$$c_3 \rho_3 \left(\frac{\partial T_{3,i}}{\partial t} + w_{3,i} \frac{\partial T_{3,i}}{\partial x} \right) = -4\pi \alpha_i r_{k,i}^2 n_i (T_{3,i} - T_2) + G_i Q_{Al} \frac{2\mu_{Al}}{3\mu_O}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_2 u)}{\partial x} = - \sum_{i=1}^N G_i; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_{3,i}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_{3,i} w_i)}{\partial x} = G_i; \quad (5)$$

$$\frac{\partial w_{3,i}}{\partial t} + w_{3,i} \frac{\partial w_{3,i}}{\partial x} = -\tau_{tr,i}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial (n_i w_{3,i})}{\partial x} = 0; \quad (7)$$

$$P = \rho_2 R T_2 = \text{const}; \quad (8)$$

$$V_k = (v_f m_f + v_{ox} m_{ox}) / \rho_k; \quad (9)$$

$$Q_s = \alpha_{ox} (Q_{gp} - Q_l) - (v_f H_p + v_{Al} c_{Al}) \frac{m_f}{\rho_l V_k}, \quad (10)$$

$$i = 1, \dots, N.$$

Принятые обозначения: α – коэффициент теплоотдачи; α_{ox} , α_f , α_{Al} – массовая доля окислителя, горючего, алюминия в составе СТТ; λ – коэффициент теплопроводности; v – объемная доля; ρ_p – плотность СТТ; ρ_2 – плотность газа;

ρ_3 – приведенная плотность частиц (масса частиц в единице объема); $\tau_{\text{тр}}$ – сила трения; μ_{Al} , μ_{O} – молярные массы молекул алюминия и кислорода; c_2 – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; c_{Al} – теплоемкость алюминия; c_p – тепловой эффект эндотермической реакции пиролиза; D – коэффициент диффузии; G – скорость изменения массы частиц при их горении; m – массовый поток с единицы поверхности; n – число частиц в единице объема; P – давление; Q_2 – тепловой эффект реакции в газовой фазе; Q_{Al} – теплота сгорания алюминия; $Q_{\text{гр}}$ – теплота разложения окислителя в газовой фазе; Q_l – скрытая теплота разложения окислителя; Q_s – тепловой эффект реакции в к-фазе; R – газовая постоянная; R_y – универсальная газовая постоянная; R_{Al} – радиус алюминия; r_k – радиус частицы; t – время; T – температура; u – скорость газа; V_k – линейная скорость горения; w_3 – скорость частиц; x – координата; Y – относительная концентрация горючего в газовой фазе; $\rho_p = 1/(\alpha_{\text{ox}}/\rho_{\text{ox}} + \alpha_f/\rho_f + \alpha_{\text{Al}}/\rho_{\text{Al}})$; $m_f = (\rho_f + \rho_{\text{Al}})A_f \exp(E_f/RT_s)$; $m_{\text{ox}} = \rho_p V_k (\alpha_{\text{ox}}/v_{\text{ox}})$.

Индексы: 2 – газовая фаза, i – номер фракции частиц, N – количество фракций, 3 – частицы конденсированной фазы продуктов горения, ox – окислитель, f – связующее, Al – алюминий, k – топливо.

В системе уравнений (1) – (10) уравнения (1), (3) – уравнения энергии для газовой фазы и фракций частиц алюминия, (2) – уравнение для глубины выгорания горючего в газовой фазе, (4) – уравнение сохранения массы газовой фазы, (5) – уравнение сохранения массы i -й фракции частиц, (6) – уравнение движения частиц, (7) – уравнение для числа частиц во фракциях, (8) – уравнение состояния идеального газа, (9) – уравнение для определения линейной скорости горения, (10) – уравнение суммарного теплового эффекта к-фазы.

Координата $x = 0$ соответствует поверхности горения. На границе $x = 0$ граничные условия выражают законы сохранения массы и энергии:

$$\lambda_2 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \rho_1 V_k (c_2 T_2|_{x=0} - Q_s - c_k T_{k,0}), \quad T_{3,i}|_{x=0} = T_2|_{x=0},$$

$$\rho_k V_k = \rho_2 u|_{x=0}, \quad \rho_k V_k Y = D_2 \left. \frac{\partial Y}{\partial x} \right|_{x=0} + \rho_2 u Y|_{x=0}, \quad (11)$$

$$\rho_{3,i} V_k = \rho_{3,i} w_{3,i}|_{x=0}, \quad \rho_2|_{x=0} = \frac{P}{R T_2|_{x=0}}, \quad n_i|_{x=0} = \frac{\rho_{3,i}|_{x=0}}{(4/3)\pi r_{\text{Al},0,i}^3 \rho_{\text{Al}}}, \quad P = \text{const}$$

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

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\infty} = 0, \quad \left. \frac{\partial Y}{\partial x} \right|_{x=\infty} = 0. \quad (12)$$

Начальные условия:

$$T_2(x, 0) = T_{\text{ign}}, \quad T_{3,i}(x, 0) = T_{\text{ign}}, \quad Y(x, 0) = 0, \quad \rho_2(x, 0) = \frac{P}{R T_2(x, 0)},$$

$$\rho_{3,i}(x, 0) = 0, \quad w_{3,i}(x, 0) = 0, \quad n_i(x, 0) = 0. \quad (13)$$

В уравнении (6) сила взаимодействия частиц алюминия с газом вычисляется по формуле

$$\tau_{tr,i} = \frac{F_{tr,i}}{\frac{4}{3}\pi r_{k,i}^3 \rho_{Al}}, \quad F_{tr,i} = C_{R,i} S_{m,i} \frac{\rho_2 (w_{3,i} - u) |u - w_{3,i}|}{2},$$

$$C_{R,i} = \frac{24}{Re_i} (1 + 0,15 Re_i^{0,682}), \quad Re_i = \frac{2\rho_2 r_{k,i} |u - w_{3,i}|}{\eta}, \quad S_m = \frac{\pi d_{Al,i}^2}{4}, \quad (14)$$

где Re – число Рейнольдса, S_m – площадь миделева сечения, C_R – коэффициент трения, ρ_{Al} – плотность алюминия, η – коэффициент динамической вязкости. Коэффициент теплоотдачи α_i определяется по формуле [6]

$$\alpha_i = \frac{Nu_i \lambda_2}{2r_{k,i}}, \quad Nu_i = 2 + \sqrt{Nu_{l,i}^2 + Nu_{t,i}^2},$$

$$Nu_{l,i} = 0,664 Re_i^{0,5}, \quad Nu_{t,i} = 0,037 Re_i^{0,8}, \quad (15)$$

где Nu – число Нуссельта;

$$G_i = \frac{3\mu_O}{2\mu_{Al}} n_i \rho_{Al} 4\pi r_{Al,i}^2 k_{Al} \frac{a^{0,9}}{\sqrt{r_{Al,i}}}, \quad k_{Al} = 2,22 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{1,5}/\text{с}. \quad (16)$$

Здесь k_{Al} – константа скорости горения частицы алюминия в среде окислителя, a – коэффициент избытка окислителя.

$$r_{Al,i} = \left[\left(\frac{\mu_{Al} + 3/2\mu_O}{\mu_{Al}} r_{Al,0,i}^3 - \frac{\rho_{3,i}}{(4/3)\pi n_i \rho_{Al}} \right) \frac{2\mu_{Al}}{3\mu_O} \right]^{1/3},$$

$$r_{k,i} = \left[r_{Al,i}^3 + \frac{\mu_{Al} + 3/2\mu_O}{\mu_{Al}} (r_{Al,0,i}^3 - r_{Al,i}^3) \right]^{1/3}. \quad (17)$$

В качестве объекта исследования выбрано СТТ на основе перхлората аммония с массовой долей в составе равной 0,62, связующим бутилкаучуком с массовой долей в смеси 0,12 и порошком алюминия массовой долей 0,18. Значения теплофизических и формально-кинетических параметров, используемых в расчетах:

$$\lambda_2 = 1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}), \quad Q_2 = 2435300 \text{ Дж}/\text{кг}, \quad Q_{AL} = 36,5 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг},$$

$$c_1 = 1465 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad c_2 = 1466,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad c_3 = 760 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$\rho_{Al} = 2600 \text{ кг}/\text{м}^3, \quad a = 0,5, \quad \eta = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad E_1 = 79733 \text{ Дж}/\text{моль},$$

$$E_2 = 188325 \text{ Дж}/\text{моль}, \quad R_y = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}), \quad R = 264,36 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$k_0 = 0,98 \cdot 10^{10} \text{ 1/с}, \quad k_{Al} = 2,22 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{1,5}/\text{с}, \quad T_{1,0} = 293 \text{ К}, \quad \mu_{Al} = 0,027 \text{ кг}/\text{моль},$$

$$\mu_O = 0,016 \text{ кг}/\text{моль}, \quad D_2 = Le \cdot \lambda_2 / (c_2 \rho_2), \quad Le \text{ – число Льюиса, для газовой фазы}$$

$$Le = 1, \quad \rho_f = 1270 \text{ кг}/\text{м}^3, \quad \rho_{ox} = 1960 \text{ кг}/\text{м}^3, \quad A_f = 0,4 \text{ м/с},$$

$$E_f = 50241,6 \text{ Дж}/\text{моль}, \quad Q_f = 5024,16 \text{ кДж}/\text{кг}, \quad H_p = 732,7 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$c_{Al} = 903 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad (Q_{gr} - Q_1) = 1339,78 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Температура воспламенения частиц принималась равной 1300 К [3].

Исследуемыми порошками алюминия выбраны марки АСД-1, АСД-4, АСД-6. Размер частиц в расчетах брался равным среднemasсовому размеру для каждой марки порошка алюминия. На основе данных о среднemasсовых размерах частиц алюминия этих марок [7–10], средние значения радиусов частиц алюминия соответствующих марок взяты следующие:

$$\text{АСД-1} - r_{\text{Al},0} = 10 \text{ мкм},$$

$$\text{АСД-4} - r_{\text{Al},0} = 5 \text{ мкм},$$

$$\text{АСД-6} - r_{\text{Al},0} = 3 \text{ мкм}.$$

Система уравнений решалась численно методом, изложенным в [11].

Результаты расчета зависимости скорости горения от давления при заданном размере частиц алюминия представлены на рис. 1.

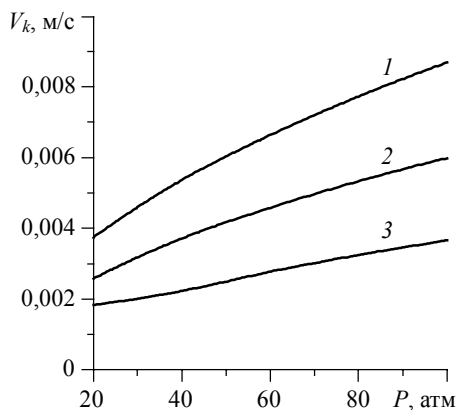


Рис. 1. Зависимость скорости горения металлизированного СТТ от давления: кр. 1 – $r_{\text{Al},0} = 3$ мкм, кр. 2 – $r_{\text{Al},0} = 5$ мкм, кр. 3 – $r_{\text{Al},0} = 10$ мкм

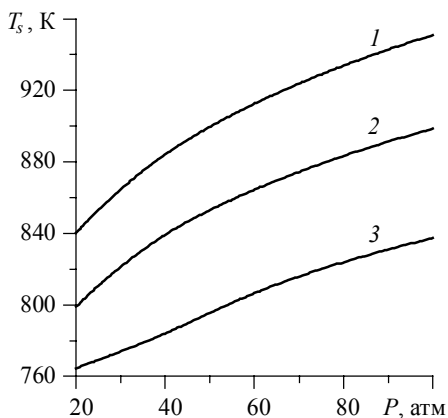


Рис. 2. Зависимость температуры поверхности металлизированного СТТ от давления: кр. 1 – $r_{\text{Al},0} = 3$ мкм, кр. 2 – $r_{\text{Al},0} = 5$ мкм, кр. 3 – $r_{\text{Al},0} = 10$ мкм

Изменение скорости горения с изменением размера частиц обусловлено изменением теплового баланса у поверхности горения. Попадая в газ с нулевой скоростью, частицы подхватываются потоком газа и, за счет сил трения, разгоняются до скорости газа. В газовой фазе идут экзотермические реакции и происходит теплообмен между частицами и газом. Частицы прогреваются до температуры воспламенения, начинают гореть и нагревать газ. Чем меньше размер частицы алюминия, тем ближе к поверхности к-фазы происходит ее воспламенение. Горение частиц алюминия влияет на величину теплового потока к поверхности к-фазы, увеличивая ее температуру и скорость горения (рис. 1 и 2). Распределения температуры, скорости газа и частиц вблизи поверхности к-фазы представлено на рис. 3 и 4.

Для анализа влияния дисперсности порошка алюминия на скорость горения СТТ были выбраны модельные составы смеси порошков алюминия при их суммарной массовой концентрации 0,18. Массовое соотношение фракций – 1:1. Размеры (радиусы) частиц при бидисперсном распределении: 3 мкм – 5 мкм, 5 мкм – 10 мкм, 3 мкм – 10 мкм. Было проведено сравнение расчетных значений линейной скорости горения СТТ с бидисперсными смесями порошков алюминия и монодисперсными порошками. Результаты представлены в таблице и на рис. 5.

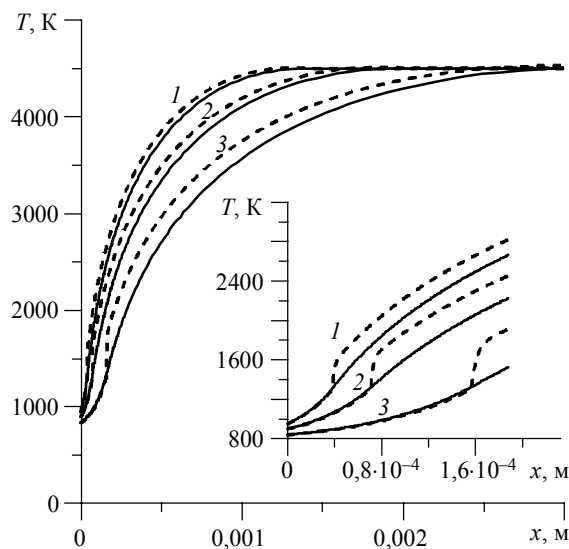


Рис. 3. Распределение температуры газа (сплошные линии) и частиц алюминия (пунктирные): кр. 1 – $r_{Al,0} = 3$ мкм, кр. 2 – $r_{Al,0} = 5$ мкм, кр. 3 – $r_{Al,0} = 10$ мкм

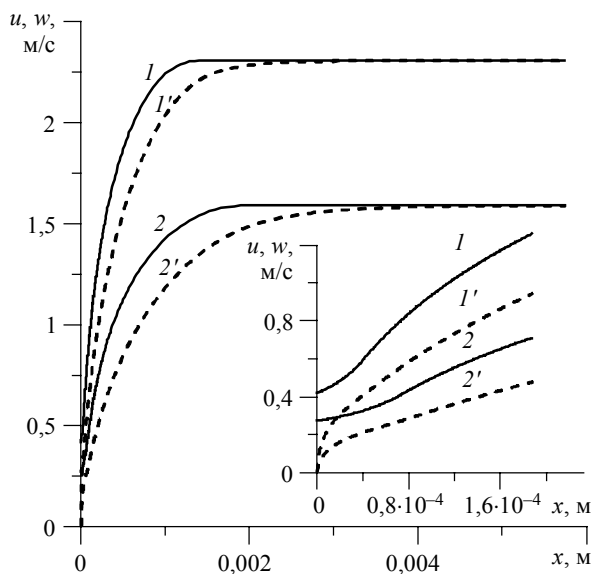


Рис. 4. Распределение скорости газа (сплошные линии) и частиц алюминия (пунктирные): кр. 1 – $r_{Al,0} = 3$ мкм, кр. 2 – $r_{Al,0} = 5$ мкм

Распределение температуры над поверхностью СТТ, содержащим монодисперсный и бидисперсный порошок алюминия представлено на рисунке 5. Рассматривая профили температур частиц $r_{Al,0} = 3$ мкм и $r_{Al,0} = 10$ мкм в случае моно- и бидисперсного распределения, можно увидеть, что воспламенение мелких час-

тиц в случае бидисперсного распределения происходит дальше от поверхности горения, при этом воспламенения крупных частиц происходит ближе к поверхности горения. В случае бидисперсного порошка алюминия в составе СТТ мелкие частицы воспламеняются первыми, а затем воспламеняются крупные. В случае монодисперсного мелкого порошка алюминия в составе СТТ при их горении в газовой фазе они воспламеняются ближе к поверхности и быстрее нагревают газ, что приводит к формированию большего градиента температуры над поверхностью к-фазы (кривые 1 и 3 на рис. 5).

Зависимость скорости горения и температуры поверхности металлизированного СТТ от дисперсности частиц алюминия

Состав	1	2		3	4		5	6	
$r_{Al,0}$, мкм	3	3	5	5	5	10	10	3	10
Массовые доли фракций	0,18	0,9	0,9	0,18	0,9	0,9	0,18	0,9	0,9
V_k , мм/сек	8,7	7,4		6,0	4,9		3,7	6,4	
T_{sz} , К	951,1	927		898,6	871,5		837,3	907,8	

Состав: 1 – 18 мас.% $r_{Al,0} = 3$ мкм; 2 – 9 мас.% $r_{Al,0} = 3$ мкм + 9 мас.% $r_{Al,0} = 5$ мкм; 3 – 18 мас.% $r_{Al,0} = 5$ мкм; 4 – 9 мас.% $r_{Al,0} = 5$ мкм + 9 мас.% $r_{Al,0} = 10$ мкм; 5 – 18 мас.% $r_{Al,0} = 10$ мкм; 6 – 9 мас.% $r_{Al,0} = 3$ мкм + 9 мас.% $r_{Al,0} = 10$ мкм. Для всех составов массовая доля ПХА – 62 мас.%, связующего – 20 мас.%.

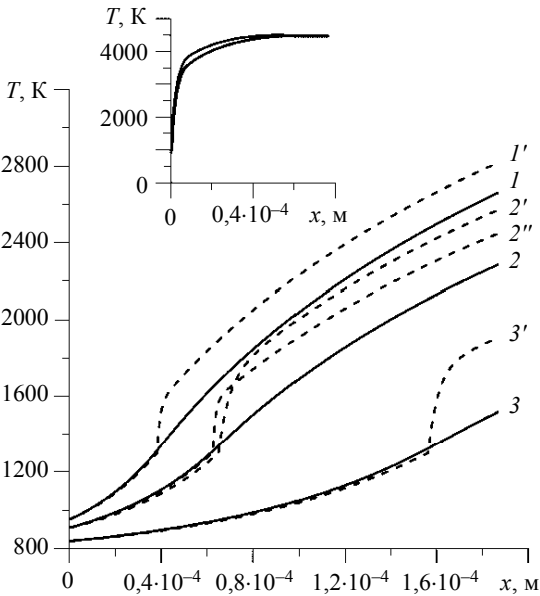


Рис. 5. Распределение температуры газа и частиц алюминия над поверхностью СТТ: 1 – монодисперсный порошок алюминия $r_{Al,0} = 3$ мкм (кр. 1 – температура газа, кр. 1' – температура частиц), 2 – бидисперсный порошок алюминия $r_{Al,0} = 3$ мкм и $r_{Al,0} = 10$ мкм (кр. 2 – температура газа, кр. 2' – температура частиц алюминия $r_{Al,0} = 3$ мкм, кр. 2'' – температура частиц алюминия $r_{Al,0} = 10$ мкм), 3 – монодисперсный порошок алюминия $r_{Al,0} = 10$ мкм (кр. 3 – температура газа, кр. 3' – температура частиц $r_{Al,0} = 10$ мкм). $P = 100$ атм

В результате проведенного исследования влияния дисперсности частиц алюминия в составе СТТ на линейную скорость горения показано, что дисперсность частиц алюминия, выходящих в газовую фазу при горении СТТ, оказывает существенное влияние на распределение параметров состояния среды над поверхностью СТТ и на скорость его горения. Для расчета линейной скорости горения металлизированного СТТ важна информация не только о кинетике химических реакций в газовой фазе, но и о дисперсности частиц алюминия, вылетающих с поверхности к-фазы в газ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Hernance C.E.* A model of composite propellant combustion including surface heterogeneity and heat generation // *AIAA Journal*. 1966. V. 4. No. 9. P. 1629.
2. *Булгаков В.К., Липанов А.М.* Теория эрозийного горения твердых ракетных топлив. М.: Наука, 2001. 122 с.
3. *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.
4. *Порязов В.А., Крайнов А.Ю.* Математическое моделирование горения смесевых составов, содержащих мелкодисперсный алюминий // *Изв. вузов. Физика*. 2013. Т. 56. № 9/3. С. 196–199.
5. *Порязов В.А., Крайнов А.Ю.* Влияние фракционного порошка алюминия в составе пороха Н на скорость его горения // *Труды Томского государственного университета*. Т. 292. Серия физико-математическая: Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2013. С. 39–42.
6. *Справочник по теплообменникам*: в 2 т. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1987. 561 с.
7. *Ягодников Д.А., Гусаченко Е.И.* Экспериментальное исследование дисперсности конденсированных продуктов сгорания аэрозвеси частиц алюминия // *Физика горения и взрыва*. 2004. Т. 40. № 2. С. 33–40.
8. *Ягодников Д.А.* Воспламенение и горение порошкообразных металлов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 432 с.
9. *Физика и химия горения нанопорошков металлов в азотсодержащих газовых средах* / под ред. А.А. Громова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. 332 с.
10. *Архипов В.А., Коротких А.Г.* Особенности зажигания и термического разложения взм на основе нитрата аммония и активного связующего // *Химическая физика и мезоскопия*. 2011. Т. 13. № 2. С. 155–164.
11. *Порязов В.А., Крайнов А.Ю., Крайнов Д.А.* Математическое моделирование горения пороха Н с добавлением порошка алюминия // *ИФЖ*. 2015. Т. 88. № 1.

Статья поступила 12.01.2015 г.

Porjazov V.A. THE INFLUENCE OF ALUMINUM PARTICLE DISPERSION ON THE BURNING RATE OF METALLIZED SOLID PROPELLANTS. DOI 10.17223/19988621/33/10

The paper presents a physical-mathematical model for combustion of a mixed solid propellant based on ammonium perchlorate with addition of aluminum (Al) particles. The thermal effect of the condensed phase decomposition, convection, diffusion, the gas phase exothermic reaction, Al particles heating up and burning in the gas flow, the combustion products flow, and the particle velocity lag compared with that of gas were taken into consideration. The study also focused on how the size and mass fraction of Al particles leaving the burning surface affect the burning rate. The size effect of Al particles leaving the burning surface on the gas parameters distribution and linear burning rate was studied. It was shown that the Al particle dispersion in the gas phase had a significant influence on the distribution of parameters in the layer above the burning surface and on the burning rate. Thus, to calculate the linear burning rate of a metallized solid propellant, it is

important to know not only the kinetics of chemical reactions in the gas phase, but also the dispersion of metal particles leaving the burning surface of the condensed phase.

Keywords: metallized solid propellant, burning rate, aluminum particle dispersion, gas phase.

PORIAZOV Vasilii Andreevich (M.Sc., Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation)
E-mail: poryazov@mail.ru

REFERENCES

1. Hermance C.E. A model of composite propellant combustion including surface heterogeneity and heat generation. *AIAA Journal*, 1966, vol. 4, no. 9, pp. 1629.
2. Bulgakov V.K., Lipanov A.M. *Teoriya erozionnogo goreniya tverdykh raketnykh topliv*. Moscow, Nauka Publ., 2001, 122 p. (in Russian)
3. Belyaev A.F., Frolov Yu.V., Korotkov A.I. Combustion and ignition of particles of finely dispersed aluminum. *Fizika goreniya i vzryva*, 1968, vol. 4, no. 3, pp. 323–329
4. Poryazov V.A., Kraynov A.Yu. Matematicheskoe modelirovanie goreniya smesevykh sostavov, sodержashchikh melkodispersnyy alyuminiy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 9/3, pp. 196–199. (in Russian)
5. Poryazov V.A., Kraynov A.Yu. Vliyanie fraktsionnogo poroshka alyuminiya v sostave porokha N na skorost' ego goreniya. *Trudy Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya fiziko-matematicheskaya: Aktual'nye problemy sovremennoy mekhaniki sploshnykh sred i nebesnoy mekhaniki*. Tomsk, Tomsk St. Univ. Publ., 2013, vol. 292, pp. 39–42. (in Russian)
6. Petukhov B.S., Shikov V.K. (eds.). *Spravochnik po teploobmennikam*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, vol. 1. 561 p. (in Russian)
7. Yagodnikov D.A., Gusachenko E.I. Experimental study of the disperse composition of condensed products of aluminum-particle combustion in air. *Combustion, explosion, and shock waves*, 2004, vol. 40, no. 2, pp. 154–162.
8. Yagodnikov D.A. *Vosplamenenie i gorenie poroshkoobraznykh metallov*. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2009, 432 p. (in Russian)
9. Gromov A.A., ed. *Fizika i khimiya goreniya nanoporoshkov metallov v azotsoderzhashchikh gazovykh sredakh*. Tomsk, Tomsk St. Univ. Publ., 2007, 332 p. (in Russian)
10. Arkhipov V.A., Korotkikh A.G. Osobennosti zazhiganiya i termicheskogo razlozheniya vem na osnove nitrata ammoniya i aktivnogo svyazuyushchego. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*, 2011, vol. 13, no. 2, pp. 155–164. (in Russian)
11. Poryazov V.A., Kraynov A.Yu., Kraynov D.A. Matematicheskoe modelirovanie goreniya porokha N s dobavleniem poroshka alyuminiya. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2015, vol. 88, no. 1. (in Russian)