

УДК 536.46+662.61

DOI 10.17223/19988621/72/11

В.А. Порязов, К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГОРЕНИЯ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА,
СОДЕРЖАЩЕГО БИДИСПЕРСНЫЙ ПОРОШОК БОРА¹**

Представлены результаты численного моделирования горения смесового твердого топлива, содержащего бидисперсный порошок бора. Физико-математическая постановка задачи основана на подходах механики двухфазных реагирующих сред. Для определения линейной скорости горения использована модель горения смесового твердого топлива Германса, основанная на предположении, что скорость горения определяется массовыми потоками компонентов с поверхности топлива. Решение выполнено численно с использованием алгоритма распада произвольного разрыва. Получены зависимости линейной скорости горения смесового твердого топлива от дисперсности частиц бора и давления газа над поверхностью топлива.

Ключевые слова: *смесовое твердое топливо, бор, линейная скорость горения.*

Задача горения смесового твердого топлива, содержащего различные порошки металлов и неметаллов, является актуальной в плане исследования влияния различных составов порошков на линейную скорость горения топлива. Одним из направлений в этой области исследования является определение влияния добавки порошка бора на скорость горения смесового твердого топлива.

Частицы бора отличаются высокими температурами плавления и кипения [1]. Это может приводить к недогоранию бора при горении смесового твердого топлива. И поэтому, несмотря на достаточно высокий тепловой эффект от сгорания порошка бора, на текущий момент использование бора в составах твердых топлив не имеет достаточного обоснования. Для того чтобы прогнозировать поведение смесовых твердых топлив, содержащих порошок бора, требуется проводить достаточно большое количество экспериментальных исследований. С целью предварительного прогноза предлагается использовать инструменты численного моделирования для решения задач горения смесового твердого топлива.

Одной из проблем, возникающих при численном моделировании горения топлива на основе порошка бора, является формулировка надежной модели физико-химических превращений, происходящих при горении частиц бора. В настоящей работе предлагается использовать ранее сформулированную модель окисления и горения частиц бора [2]. Модель [2] основана на классической модели [3] с предположениями из [4]. При наличии в газе водяного пара, хлора, азота скорость горения частиц бора меняется [5]. Присутствие водяного пара в окружающем частицу газе снижает температуру воспламенения частиц бора. Присутствие хлора или азота в газе приводит к уменьшению скорости горения частиц бора из-за

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10054).

снижения удельной теплоты горения бора и возникновения промежуточных продуктов реакции.

В настоящей работе присутствие в газе компонентов водяного пара, хлора, азота учитывается путем уменьшения теплоты реакций окисления и горения частиц бора. Механизм реагирования при этом аналогичен [2]. При относительно низких температурах частицы бора оксид бора находится в конденсированном состоянии и образует на поверхности частицы пленку. Полагается, что в этом случае идет процесс окисления частицы с образованием оксидного слоя и одновременным испарением оксидного слоя. Если температура частицы бора высокая, то происходит интенсивное испарение окисного слоя. После полного испарения оксидного слоя частица бора реагирует гетерогенно. В ходе высокотемпературного реагирования образуются промежуточные газообразные продукты реакции BO и B_2O_2 , которые далее реагируют с окислителем в газовой фазе с образованием конечного газообразного оксида B_2O_3 .

Для определения линейной скорости горения в данной работе использована модель горения смесового твердого топлива Германса [6], основанная на предположении, что скорость горения определяется массовыми потоками компонентов с поверхности топлива.

Целью исследования является определение скорости горения смесового твердого топлива, содержащего бидисперсный порошок бора, в зависимости от давления газа над поверхностью топлива и дисперсности частиц бора.

Физико-математическая модель и метод решения

Математическая постановка задачи формулируется при следующих допущениях. Слева от границы рассматриваемой области находится смесовое твердое топливо (СТТ), состоящее из окислителя, связки и частиц бора с массовыми долями $\alpha_{\text{ок}}$, α_f , α_B соответственно. На правой границе области полагается свободное истечение газодисперсной смеси. С поверхности твердого топлива при испарении поступают продукты его газификации и частицы бора. Скорость истечения компонентов определяется линейной скоростью горения СТТ. Продукты газификации топлива состоят из смеси газообразных окислителя и горючего, способных к экзотермической химической реакции. Скорость реакции в газе зависит от температуры по закону Аррениуса. Коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры. Реакции окисления и горения частиц бора подробно описаны в [2]. В физико-математической постановке задачи эти реакции учитываются в правых частях уравнений через источники изменения массы за счет окисления частиц, испарения окисной пленки с поверхности частиц, двух гетерогенных реакций на поверхности частицы бора. Гетерогенные реакции учитывают образование промежуточных газообразных продуктов реакции BO и B_2O_2 и последующее их реагирование в газе с образованием конечного продукта реакции в виде газообразного оксида B_2O_3 . Общая масса частиц в составе топлива равна

$$m_{\text{dust}} = \sum_{j=1}^2 \alpha_B \rho_c \Delta_{p,j} = \alpha_B \rho_c,$$

$\Delta_{p,j}$ – доля частиц j -й фракции в общей массе частиц бора, α_B – массовая доля порошка бора в составе топлива, ρ_c – плотность смесового твердого топлива.

При заданных допущениях физико-математическая постановка задачи записывается в виде

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u_g}{\partial x} = \sum_{j=1}^2 (G_{1,j} + G_{2,j} - \alpha_3 G_{3,j} + G_{4,j}); \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho_g u_g)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g u_g^2 + p)}{\partial x} = \sum_{j=1}^2 [(G_{1,j} + G_{2,j} - \alpha_3 G_{3,j} + G_{4,j}) u_{p,j} - \tau_{fr,j}]; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_g (\epsilon_g + 0.5 u_g^2)}{\partial t} + \frac{\partial [\rho_g u_g (\epsilon_g + 0.5 u_g^2) + p u_g]}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_g (T_g) \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + Q_5 G_5 - \\ &- \sum_{j=1}^2 [u_{p,j} \tau_{fr,j} - (Q_3 - Q_1) G_{1,j} - (Q_3 - Q_2) G_{2,j}] + \\ &+ \sum_{j=1}^2 [\alpha_{p,j} n_{p,j} S_{p,j} (T_{p,j} - T_g) + (G_{1,j} + G_{2,j} - \alpha_3 G_{3,j} + G_{4,j}) (c_p T_{p,j} + 0.5 u_{p,j}^2)]; \quad (3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \rho_{ox}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{ox} u_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_g \rho_g (T_g) \frac{\partial a_{ox}}{\partial x} \right) - G_5 - \sum_{j=1}^2 (\alpha_1 G_{1,j} + \alpha_2 G_{2,j} + \alpha_3 G_{3,j}); \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_{B2O3}^g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{B2O3}^g u_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_g \frac{\partial \rho_{B2O3}^g}{\partial r} \right) + \sum_{j=1}^2 [(1 + \alpha_1) (G_{1,j} + G_{2,j}) + G_{4,j}]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_{p,j}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{p,j} u_{p,j}}{\partial x} = - (G_{1,j} + G_{2,j} - \alpha_1 G_{3,j} + G_{4,j}), \quad j = 1, 2; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho_{B2O3,j}^k}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{B2O3,j}^k u_{p,j}}{\partial x} = (1 + \alpha_3) G_{3,j} - G_{4,j}, \quad j = 1, 2; \quad (7)$$

$$\frac{\partial (\rho_{p,j} u_{p,j})}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{p,j} u_{p,j}^2}{\partial x} = \tau_{fr,j} - (G_{1,j} + G_{2,j} - \alpha_3 G_{3,j} + G_{4,j}) u_{p,j}, \quad j = 1, 2; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{p,j} (\epsilon_{p,j} + 0.5 u_{p,j}^2)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{p,j} u_{p,j} (\epsilon_{p,j} + 0.5 u_{p,j}^2)}{\partial x} &= -\alpha_{p,j} S_{p,j} n_{p,j} (T_{p,j} - T_g) + \\ &+ \tau_{fr,j} u_{p,j} - (G_{1,j} + G_{2,j} - \alpha_3 G_{3,j} + G_{4,j}) (c_p T_{p,j} + 0.5 u_{p,j}^2) + \\ &+ Q_1 G_{1,j} + Q_2 G_{2,j} + Q_3 G_{3,j} - Q_4 G_{4,j}, \quad j = 1, 2; \quad (9) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial n_{p,j}}{\partial t} + \frac{\partial n_{p,j} u_{p,j}}{\partial x} = 0, \quad j = 1, 2; \quad (10)$$

$$p = \rho_g R_g T_g; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} T_g(x, 0) &= T_{p,j}(x, 0) = T_b, \quad \rho_{ox}(x, 0) = 0, \quad \rho_{p,j}(x, 0) = 0, \\ \rho_g(x, 0) &= \rho_b, \quad \rho_{B2O3,j}^k(x, 0) = \rho_{B2O3,j}^{kb}, \quad \rho_{B2O3}^g(x, 0) = 0, \\ u_g(x, 0) &= u_{p,j}(x, 0) = 0, \quad n_{p,j}(x, 0) = 0, \quad j = 1, 2; \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\lambda_g \frac{T_g(0,t)}{\partial x} &= \rho_c V_c (c_{p,g} T_g(0,t) - Q_s - c_c T_s), \quad \frac{\partial \rho_{B_2O_3,j}^k(0,t)}{\partial x} = \frac{\partial \rho_{B_2O_3}^g(0,t)}{\partial x} = 0, \\
T_{p,j}(0,t) &= T_g(0,t), \quad \rho_{p,j}(0,t) = \alpha_B \rho_c \Delta_{p,j}, \quad \rho_g(0,t) = \frac{p}{R_g T_g(0,t)}, \\
\alpha_{ox} V_c \rho_c &= D_g \frac{\partial \rho_{ox}(0,t)}{\partial x} + u_g(0,t) \rho_{ox}(0,t), \quad n_{p,j}(0,t) = \frac{\rho_{p,j}(0,t)}{(4/3)\pi r_{p0,j}^3 \rho_{p,j}^0}, \\
\alpha_B \rho_c V_c \Delta_{p,j} &= \rho_{p,j}(0,t) u_{p,j}(0,t), \quad (1 - \alpha_B) \rho_c V_c = \rho_g(0,t) u_g(0,t); \quad (13) \\
p(x_e, t) &= p_e, \quad (14)
\end{aligned}$$

где $\rho_{B_2O_3,j}^{kb}$ – начальная масса окисла на поверхности части j -й фракции; $\alpha_p = Nu_p \lambda_g / (2r_p)$ – коэффициент теплообмена газа с частицами; α_i – стехиометрические коэффициенты реакций кислорода с горючими компонентами (частицами и газом); $\gamma = c_{p,g} / c_{v,g}$ – показатель адиабаты; $\varepsilon_g = p / (\rho_g (\gamma - 1))$ – внутренняя энергия газа; $\varepsilon_p = c_p T_p$ – внутренняя энергия частиц; $\lambda = \lambda_{st} (T_g / T_b)^{2/3}$ – коэффициент теплопроводности газа; ρ_g – плотность газа; ρ_{ox} – парциальная плотность окислителя; ρ_p – распределенная плотность вещества частиц; $\rho_{B_2O_3}^g$ – газообразный оксид бора; $\rho_{B_2O_3}^k$ – распределенная плотность конденсированного оксида бора; c – удельная теплоемкость; D – коэффициент диффузии; G – скорость изменения массы частиц при горении или окислении; p – давление; Q – тепловой эффект реакции; Q_s – суммарный тепловой эффект реакций на поверхности к-фазы; R_g – газовая постоянная; t – время; T_s – температура поверхности топлива; T – температура; u – скорость; V_c – линейная скорость горения; x – координата. Индексы: 1, 2, 3, 4, 5 – индексы для реакций; B – параметры бора, содержащегося в частице; B_2O_3 – параметры оксида бора; b – начальные значения параметров состояния; c – параметры смесового твердого топлива; g – параметры газа; p – параметры частиц; ox – окислитель; f – горючее; st – параметры при нормальных условиях.

Радиусы частиц и радиусы бора в частицах определялись аналогично [2] из выражений:

$$r_{p,j} = \sqrt[3]{3\rho_{p,j} / (4\pi n_{p,j} \rho_p^0)}, \quad r_{B,j} = \left[\left(\frac{\mu_B + 3/2 \mu_{ox}}{\mu_B} r_{p0,j}^3 - \frac{\rho_{p,j}}{(4/3)\pi n \rho_p^0} \right) \frac{2\mu_B}{3\mu_{ox}} \right]^{1/3}$$

(на этапе окисления частицы), $r_{B,j} = r_{p,j}$ (на этапе гетерогенного горения частицы бора), в которых ρ_p^0 – плотность материала частиц, μ_B , μ_{ox} – молярные массы бора и окислителя, $r_{p0,j}^3$ – начальный радиус частиц j -й фракции.

Скорости изменения массы частиц бора за счет гетерогенных реакций на поверхности частиц ($G_{1,2}$), за счет окисления частиц с образованием конденсированного оксида B_2O_3 (G_3), а также за счет испарения расплава оксида B_2O_3 (G_4) определялись аналогично работе [2] (обозначения также соответствуют работе [2]).

Сила трения между частицами и газом, а также коэффициент теплообмена между газом и частицами определяются выражениями [7].

При постановке задачи полагалось, что координата $x = 0$ соответствует поверхности смешанного твердого топлива. Граница горения перемещается со скоростью V_c , при этом температура поверхности T_s , а также скорость горения V_c смешанного твердого топлива определяются из выражений:

$$V_c = (v_f m_f + v_{ox} m_{ox}) / \rho_c$$

– выражение для определения линейной скорости горения,

$$Q_s = \alpha_{ox} H_{ox} - (v_f H_f + v_B c_B) \frac{m_f}{\rho_c V_c}$$

– суммарный тепловой эффект в конденсированной фазе,

$$\lambda_g \frac{T_g(0, t)}{\partial x} = \rho_c V_c (c_{p,g} T_g(0, t) - Q_s - c_c T_{c,0})$$

– выражение для нахождения температуры поверхности СТТ, где c_c – удельная теплоемкость СТТ,

$$m_f = (\rho_f + \rho_B) k_{0f} \exp(E_f / R(T_g(0, t))),$$

$$m_{ox} = \rho_c V_c (\alpha_{ox} / v_{ox}),$$

v_{ox}, v_f, v_B – объемные доли окислителя, горючего связующего и порошка бора в составе топлива, $\alpha_{ox}, \alpha_f, \alpha_B$ – массовые доли окислителя, горючего связующего и порошка бора в составе топлива, m_{ox}, m_f, m_B – массовые потоки окислителя, горючего связующего и порошка бора с единицы поверхности топлива, H_f, H_{ox} – тепловые эффекты реакций пиролиза связующего и разложения перхлората аммония, соответственно.

Задача (1) – (14) решалась численно, аналогично [2] с использованием метода С.К. Годунова [8] для уравнений, описывающих законы сохранения для газа, и алгоритма распада произвольного разрыва [9] для уравнений, описывающих законы сохранения для частиц.

Результаты

Формально-кинетические параметры химической реакции и теплота разложения ПХА в твердой фазе взяты из [10], формально-кинетические параметры реакции в газовой фазе взяты из [6, 11], формально-кинетические параметры химической реакции окисления бора взяты из [2]. Численное решение задачи (1) – (14) выполнено при следующих значениях физических величин:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 3.6 \text{ МДж/кг}, Q_2 = -1.3 \text{ МДж/кг}, Q_3 = 31 \text{ МДж/кг}, Q_4 = 0.3 \text{ МДж/кг}, \\ Q_5 &= 7.8 \text{ МДж/кг}, k_{01} = 10^3 \text{ м/с}, k_{02} = 10^5 \text{ м/с}, k_{05} = 10^{10} \text{ с}^{-1}, L = 0.36 \text{ МДж/кг}, \\ E_1 &= 112 \text{ кДж/моль}, E_2 = 252 \text{ кДж/моль}, E_d = 10 \text{ кДж/моль}, E_5 = 188 \text{ кДж/моль}, \\ E_f &= 50.24 \text{ кДж/моль}, D_d = 1.89 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, c_{p,g} = 1065 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \\ c_{v,g} &= 768.2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \lambda_{g,0} = 0.06 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, H_{ox} = 1339.78 \text{ кДж/кг}, \\ H_f &= 732.7 \text{ кДж/кг}, k_{0f} = 0.4 \text{ м/с}, R_u = 8.31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}, R_g = 264 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \end{aligned}$$

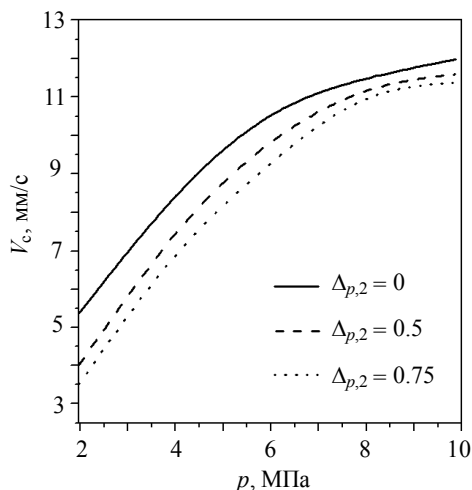
$$\rho_{ox} = 1950 \text{ кг/м}^3, \rho_f = 1270 \text{ кг/м}^3, \rho_B = 2340 \text{ кг/м}^3, \mu_B = 11 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль},$$

$$\mu_{ox} = 16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}, c_p = 1293 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, c_c = 1465 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)},$$

$$\rho_p^0 = 2340 \text{ кг/м}^3, \eta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}, T_{p,boil} = 2133 \text{ К}, \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \frac{6\mu_{ox}}{4\mu_B} = \frac{24}{11}.$$

Массовая доля окислителя в составе смесового топлива задавалась равной $\alpha_{ox} = 0.6$, доля связки $\alpha_f = 0.3$, доля бора $\alpha_B = 0.1$. Начальный радиус частиц бора варьировался в диапазоне $r_{p,0} = 0.5 \cdot 10^{-6} - 10^{-5}$ м. Предполагается, что на поверхности частиц, выходящих с поверхности СТТ в газовую фазу имеется начальный окисный слой толщиной $\Delta r_{p,0} = 10^{-3} r_{p,0}$. Давление газа над поверхностью горения варьировалось в диапазоне $2 \div 10$ МПа.

На рис. 1 представлена зависимость скорости горения смесового твердого топлива с частицами радиуса $r_{p,0,1} = 2$ мкм и $r_{p,0,2} = 10$ мкм. Для расчета взяты составы с содержанием частиц крупной фракции – 50 % (кривая, соответствующая $\Delta_{p,2} = 0.5$) и 75 % (кривая, соответствующая $\Delta_{p,2} = 0.75$). Результаты сравнивались со скоростью СТТ, содержащего монодисперсную взвесь бора радиусом 2 мкм (кривая, соответствующая $\Delta_{p,2} = 0$).



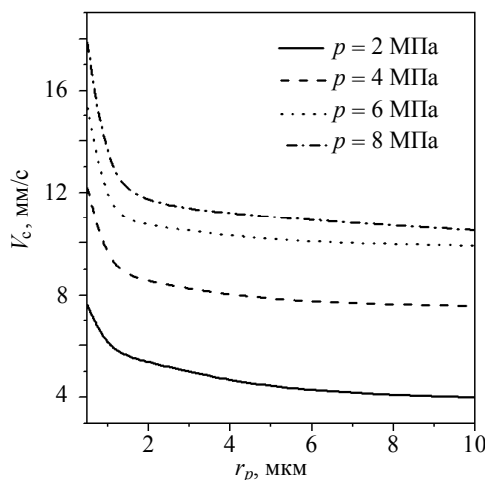
$$r_{p,0,1} = 2 \text{ мкм}, r_{p,0,2} = 10 \text{ мкм}, \alpha_B = 0.1$$

Рис. 1. Зависимость линейной скорости горения смесового твердого топлива с добавлением порошка бора от давления над поверхностью топлива

Fig. 1. Dependence of the linear burning rate of a composite solid propellant with boron powder on the pressure above the propellant surface

Согласно рис. 1, с увеличением доли крупных частиц в продуктах газификации топлива линейная скорость горения смесового твердого топлива, содержащего порошок бора, уменьшается.

На рис. 2 представлена зависимость линейной скорости горения СТТ от радиуса частиц второй фракции. Для расчета взято топливо с радиусом частиц первой фракции $r_{p0,1} = 2 \text{ мкм}$, долей бора в составе СТТ $\alpha_B = 0.1$. Результаты представлены для четырех давлений газа над поверхностью. Взята взвесь с долей частиц первой и второй фракции $\Delta_{p,1} = \Delta_{p,2} = 0.5$.



$$r_{p0,1} = 2 \text{ мкм}, \alpha_B = 0.1, \Delta_{p,1} = \Delta_{p,2} = 0.5$$

Рис. 2. Зависимость линейной скорости горения смешанного твердого топлива от радиуса частиц второй фракции

Fig. 2. Dependence of the linear burning rate of a composite solid propellant on the radius of second-fraction particles

Согласно рис. 2, при начальном радиусе частиц второй фракции больше 2 мкм линейная скорость горения смешанного твердого топлива заданного состава практически прекращает меняться с увеличением радиуса $r_{p,2}$. При давлении 8 МПа в зависимости от радиуса частиц максимальное значение линейной скорости горения СТТ составило 17.9 мм/с, минимальное — 11.9 мм/с. При давлении 2 МПа максимальное значение линейной скорости горения СТТ составило 7.6 мм/с, минимальное — 4 мм/с. Таким образом, при увеличении давления зависимость линейной скорости горения смешанного твердого топлива от радиуса частиц второй фракции возрастает. Также отметим, что для высоких давлений линейная скорость горения смешанного твердого топлива практически прекращает меняться при радиусе частиц второй фракции выше 2 мкм.

Выводы

Разработаны физико-математические модели горения смешанного твердого топлива, содержащего бидисперсный порошок бора. Для заданного состава топлива показано, что увеличение размеров частиц бора приводит к уменьшению линейной скорости горения смешанного твердого топлива. Показано, что скорость горе-

ния смесового твердого топлива с бидисперсным порошком бора изменяется по сравнению со скоростью горения СТТ, содержащего монодисперсный порошок. Это доказывает последующую необходимость учета дисперсности порошка в решении задачи о горении смесового твердого топлива, содержащего реакционно-способные частицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яновский Л.С., Лемперт Д.Б., Разносчиков В.В., Аверьков И.С., Шаров М.С. Оценка эффективности некоторых металлов и неметаллов в твердых топливах для ракетно-прямоточных двигателей // *Физика горения и взрыва*. 2020. Т. 56. № 1. С. 81–94.
2. Крайнов А.Ю., Крайнов Д.А., Моисеева К.М., Порязов В.А., Хакимов А.А. Математическое моделирование горения газозвеси порошка бора // *Инженерно-физический журнал*. 2021. Т. 94. № 2. С. 360–371.
3. King M.K. Boron Ignition and Combustion in Air-Augmented Rocket Afterburners // *Combustion Science and Technology*. 1972. V. 5. No. 4. P. 155–164.
4. Золотко А.Н., Яковлева Т.А. Потухание дисперсных гетерогенных систем // *Физика горения и взрыва*. 1996. Т. 32. № 6. С. 12–19.
5. Xu H.-X., Pang W.-Q., Guo H.-W., Zhao F.-Q., Wang Y., Sun Z.-H. Combustion characteristics and mechanism of boron-based, fuel-rich propellants with agglomerated boron powder // *Central European Journal of Energetic Materials*. 2014. V. 11. No. 4. P. 575–587.
6. Hermance C.E. A model of composite propellant combustion including surface heterogeneity and heat generation // *AIAA J.* 1966. V. 4. No. 9. P. 1629–1637.
7. Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Дементьев А.А. Определение критических условий искрового зажигания бидисперсного порошка алюминия в воздухе // *Физика горения и взрыва*. 2019. Т. 55. № 4. С. 26–33.
8. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
9. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной «собственного» давления // *Прикладная математика и механика*. 1979. Т. 43. № 3. С. 500–510.
10. Штейнберг А.С. Быстрые реакции в энергоемких системах: высокотемпературное разложение ракетных топлив и взрывчатых веществ. М.: Физматлит, 2006.
11. Булгаков В.К., Липанов А.М. Теория эрозионного горения твердых ракетных топлив. М.: Наука, 2001.

Статья поступила 20.02.2021

Poryazov V.A., Moiseeva K.M., Krainov A.Yu. (2021) NUMERICAL SIMULATION OF COMBUSTION OF THE COMPOSITE SOLID PROPELLANT CONTAINING BIDISPERSED BORON POWDER. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 72. pp. 131–139

DOI 10.17223/19988621/72/11

Keywords: composite solid propellant, boron, linear burning rate.

A problem of combustion of the composite solid propellants containing various powders of metals and non-metals is relevant in terms of studying the effect of various compositions of powders on the linear rate of propellant combustion. One of the lines of research is to determine the effect of the addition of a boron powder on the burning rate of a composite solid propellant. This work presents the results of numerical simulation of combustion of the composite solid propellant containing bidispersed boron powder. Physical and mathematical formulation of the problem is based on the approaches of the mechanics of two-phase reactive media. To determine the linear burning rate, the Hermance model of combustion of composite solid propellants is used, based on the assumption that the burning rate is determined by mass fluxes of the components outgoing from the propellant surface. The solution is performed numerically using the breakdown of an arbitrary discontinuity algorithm. The dependences of the linear burning rate of the

composite solid propellant on the dispersion of the boron particles and gas pressure above the propellant surface are obtained. It is shown that the burning rate of the composite solid propellant with bidispersed boron powder changes in contrast to that of the composite solid propellant with monodispersed powder. This fact proves that the powder dispersion should be taken into account when solving the problems of combustion of the composite solid propellants containing reactive particles.

Financial support. This work was supported by the Russian Science Foundation under Grant № 19-79-10054.

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

Kseniya M. MOISEEVA (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: Moiseeva_KM@t-sk.ru

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

REFERENCES

1. Lempert D.B., Kazakov A.I., Nabatova A.V., Dashko D.V., Stepanov A.I., Shilov G.V., Aldoshin S.M. (2020) Thermochemical and energy characteristics of dimers of terfurazanoazepines. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 56(1). pp. 621–628. DOI: 10.1134/S0010508220060015.
2. Krainov A.Y., Krainov D.A., Moiseeva K.M., Poryazov V.A., Khakimov A.A. (2021) Mathematical simulation of combustion of boron powder gas suspension. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 94(2). pp. 345–356. DOI: 10.1007/s10891-021-02304-x.
3. King M.K. (1972) Boron ignition and combustion in air-augmented rocket afterburners. *Combustion Science and Technology*. 5(4). pp. 155–164. DOI: 10.1080/00102207208952516.
4. Zolotko A.N., Yakovleva T.A. (1996) Extinction of dispersed heterogeneous systems. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 32(6). pp. 608–614. DOI: 10.1007/BF02111561.
5. Xu H.-X., Pang W.-Q., Guo H.-W., Zhao F.-Q., Wang Y., Sun Z.-H. (2014) Combustion characteristics and mechanism of boron-based, fuel-rich propellants with agglomerated boron powder. *Central European Journal of Energetic Materials*. 11(4). pp. 575–587.
6. Hermance C.E. (1966) A model of composite propellant combustion including surface heterogeneity and heat generation. *AIAA Journal*. 4(9). pp. 1629–1637. DOI: 10.2514/3.55284.
7. Moiseeva K.M., Krainov A.Yu., Dement'ev A.A. (2019) Critical conditions of spark ignition of a bidisperse aluminum powder in air. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 55(4). pp. 395–401. DOI: 10.1134/S001050821904004X.
8. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov, M.I., Krayko A.N., Prokopov G.P. (1976) *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical solution to multidimensional problems of gas dynamics]. Moscow: Nauka.
9. Kraiko A.N. (1979) On discontinuity surfaces in a medium devoid of "proper" pressure. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 43(3). pp. 539–549. DOI: 10.1016/0021-8928(79)90102-3.
10. Shteynberg A.S. (2006) *Bystrye reaktsii v energoemkikh sistemakh: vysokotemperaturnoe razlozhenie raketnykh topliv i vzryvchatykh veshchestv* [Rapid reactions in energy-intensive systems: high-temperature decomposition of rocket propellant and explosives]. Moscow: Fizmatlit.
11. Bulgakov V.K., Lipanov A.M. (2001) *Teoriya erozionnogo goreniya tverdykh raketnykh topliv* [Theory of erosional combustion of solid rocket propellants]. Moscow: Nauka.

Received: February 20, 2021