

УДК 536.46

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ДОБАВКОЙ ПОРОШКА БОРА

В. А. Порязов, К. М. Моисеева, А. Ю. Крайнов

Томский государственный университет, 634050 Томск, Moiseeva_KM@t-sk.ru

Представлена сопряженная физико-математическая модель горения смешанного твердого топлива с добавкой полидисперсного порошка бора, в которой над поверхностью твердого топлива учитываются газодинамические процессы в двухфазной, многоскоростной, многотемпературной теплопроводной среде, а также процессы теплопереноса и реагирования в твердом топливе. На поверхности топлива ставятся граничные условия равенства тепловых и массовых потоков компонентов топлива. Из численного решения системы уравнений определена зависимость скорости горения смешанного твердого топлива, содержащего частицы бора, от давления над поверхностью топлива.

Ключевые слова: смешанное твердое топливо, порошок бора, скорость горения, математическое моделирование.

DOI 10.15372/FGV20220513

ВВЕДЕНИЕ

Исследование горения смешанных твердых топлив (СТТ) и порошковых металлических горючих с добавлением порошка бора является актуальным в силу высокого теплового эффекта его сгорания [1]. Разрабатываются варианты составов борсодержащих СТТ, которые позволили бы повысить энергетические характеристики работы двигателей на порошковом и твердом топливе [1, 2].

Сложность процессов воспламенения и горения частиц бора или борсодержащих составов требует дополнительного исследования с использованием методов математического моделирования.

В [3] исследовалось влияние добавки солей щелочных и щелочноземельных металлов, а также алюминия в борсодержащие порошковые составы на особенности горения аэрозвеси. Показано, что нанесение щелочных и щелочноземельных металлов на поверхность частиц интенсифицирует окисление и воспламенение конгломератов бора и алюминия и понижает температуру воспламенения аэрозвесей этих частиц. В [4, 5] представлены результаты исследования горения борсодержащих модельных композиций СТТ: в [4] — исследование влияния добавок Al, Mg, Al₂O₃, MgO, MgF₂ на

характеристики плавления и испарения оксида бора, в [5] — исследование влияния полимерного связующего на термическую стойкость, горение и состав конденсированных продуктов горения борсодержащих композиций. В [6] представлены результаты экспериментального исследования состава продуктов горения борсодержащих твердотопливных композиций. В [7] приведены оценки характеристик горения металлизированных топлив. Указано, что эффективность горения борсодержащих составов существенно зависит от условий горения, и в ряде случаев эффективность СТТ на основе бора не доказана.

В [8] представлена физико-математическая модель горения СТТ, основанная на модели Германса [9, 10] и подходах механики двухфазных реагирующих сред [11]. В [8] получена зависимость линейной скорости горения СТТ, содержащего монодисперсную взвесь частиц бора, от давления газа над поверхностью горения, радиуса частиц бора, массового содержания порошка бора в составе топлива. Показано, что крупные частицы бора могут увеличивать линейную скорость горения СТТ. Уменьшение содержания бора в составе СТТ приводит к снижению линейной скорости горения топлива. Модель [8] не учитывает процессы, происходящие в СТТ, скорость его горения определяется процессами в газовой фазе над поверхностью топлива. Чем больше скорость горения частиц газозвеси вблизи поверхности топли-

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10054).

© Порязов В. А., Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., 2022.

ва, тем выше температура и ближе к поверхности твердого топлива расположен фронт пламени в продуктах его газификации. Соответственно, с приближением фронта к поверхности СТТ увеличиваются температура поверхности и скорость горения СТТ.

Цель настоящей работы — разработка сопряженной модели горения и проведение расчетов горения СТТ с добавкой порошка бора. Модель строится на основе подходов, предложенных в [12, 13], с использованием кинетики окисления и горения частиц бора [14], подробно изложенной в [12].

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Физико-математическая постановка задачи формулируется при следующих допущениях. Слева в рассматриваемой области находится СТТ, состоящее из окислителя и связки с добавлением порошка бора. Массовые доли компонентов топлива равны φ_{ox} , φ_f , φ_B соответственно. На правой границе области полагается истечение газодисперсной смеси в объем с заданным давлением. С поверхности твердого топлива истекают продукты его газификации и частицы бора. Газовая фаза состоит из смеси газообразных окислителя и горючего, способных к экзотермической химической реакции. Коэффициенты диффузии и теплопроводности газа зависят от температуры. Учитывается тепловое расширение газа при повышении температуры и его движение. Скорость химической реакции в газовой фазе зависит от температуры по закону Аррениуса. Газ при нагревании расширяется, возникает течение его от поверхности СТТ, которым захватываются частицы бора. Окисление и горение частиц бора включает в себя процессы образования и испарения оксида B_2O_3 , две поверхностные реакции между окислителем и бором с образованием газообразных оксидов BO и B_2O_2 , которые окисляются в газовой фазе до B_2O_3 [14]. Схема области расчета представлена на рис. 1.

При принятых допущениях математическая постановка задачи в системе координат, связанной с поверхностью топлива, имеет следующий вид.

Уравнения для твердого топлива, $-\infty < x < 0$:

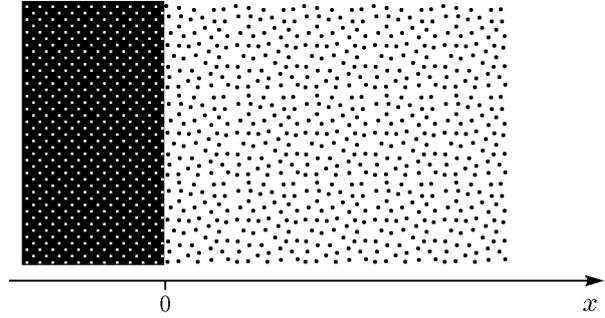


Рис. 1. Схема расчетной области

теплопроводности:

$$\rho_c c_c \left(\frac{\partial T_c}{\partial t} + V_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \right) = \lambda_c \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + Q_c k_c \rho_c (1 - \eta) \exp \left(\frac{-E_c}{RT_c} \right), \quad (1)$$

разложения окислителя:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + V_c \frac{\partial \eta}{\partial x} = k_c (1 - \eta) \exp \left(\frac{-E_c}{RT_c} \right). \quad (2)$$

Уравнения для течения продуктов газификации СТТ, $0 < x < \infty$:

сохранения массы газа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u_g}{\partial x} = \\ = \sum_{i=1,n} (G_{1,i} + G_{2,i} - \alpha_3 G_{3,i} + G_{4,i}), \end{aligned} \quad (3)$$

сохранения импульса газа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho_g u_g)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_g u_g^2 + p_g)}{\partial x} = \sum_{i=1,n} [(G_{1,i} + G_{2,i} - \\ - \alpha_3 G_{3,i} + G_{4,i}) u_{p,i} - \tau_{fr,i}], \end{aligned} \quad (4)$$

сохранения энергии газа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_g (\varepsilon_g + 0.5 u_g^2)}{\partial t} + \frac{\partial [\rho_g u_g (\varepsilon_g + 0.5 u_g^2) + p_g u_g]}{\partial x} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_g(T_g) \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + Q_5 G_5 + \\ + \sum_{i=1,n} [\alpha_{p,i} n_{p,i} S_{p,i} (T_{p,i} - T_g) - u_{p,i} \tau_{fr,i} + \\ + (Q_3 - Q_1) G_{1,i}] + \\ + \sum_{i=1,n} [(G_{1,i} + G_{2,i} - \alpha_3 G_{3,i} + G_{4,i}) \times \\ \times (c_p T_{p,i} + 0.5 u_{p,i}^2) + (Q_3 - Q_2) G_{2,i}], \end{aligned} \quad (5)$$

сохранения массы окислителя в газе:

$$\frac{\partial \rho_{ox}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{ox} u_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_g D_g \frac{\partial a_{ox}}{\partial x} \right) - \sum_{i=1, n} [\alpha_1 G_{1,i} + \alpha_2 G_{2,i} + \alpha_3 G_{3,i}] - G_5, \quad (6)$$

баланса массы газообразных продуктов реакции, $B_2O_3(g)$:

$$\frac{\partial \rho_{B_2O_3}^g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{B_2O_3}^g u_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_g D_g \frac{\partial a_{B_2O_3}^g}{\partial r} \right) + \sum_{i=1, n} [(1 + \alpha_1)(G_{1,i} + G_{2,i}) + G_{4,i}], \quad (7)$$

сохранения массы частиц i -й фракции:

$$\frac{\partial \rho_{p,i}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{p,i} u_{p,i}}{\partial x} = -(G_{1,i} + G_{2,i} - \alpha_1 G_{3,i} + G_{4,i}), \quad i = 1, \dots, n, \quad (8)$$

баланса массы твердого оксида бора i -й фракции:

$$\frac{\partial \rho_{B_2O_3,i}^k}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{B_2O_3,i}^k u_{p,i}}{\partial x} = (1 + \alpha_3) G_{3,i} - G_{4,i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (9)$$

сохранения импульса частиц i -й фракции:

$$\frac{\partial (\rho_{p,i} u_{p,i})}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{p,i} u_{p,i}^2}{\partial x} = \tau_{fr,i} - (G_{1,i} + G_{2,i} - \alpha_3 G_{3,i} + G_{4,i}) u_{p,i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (10)$$

сохранения энергии частиц i -й фракции:

$$\frac{\partial \rho_{p,i} (\varepsilon_{p,i} + 0.5 u_{p,i}^2)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{p,i} u_{p,i} (\varepsilon_{p,i} + 0.5 u_{p,i}^2)}{\partial x} = \alpha_{p,i} S_{p,i} n_{p,i} (T_{p,i} - T_g) - \tau_{fr,i} u_{p,i} - (G_{1,i} + G_{2,i} - \alpha_3 G_{3,i} + G_{4,i}) (c_p T_{p,i} + 0.5 u_{p,i}^2) + Q_1 G_{1,i} + Q_2 G_{2,i} + Q_3 G_{3,i} - Q_4 G_{4,i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (11)$$

сохранения количества частиц i -й фракции:

$$\frac{\partial n_{p,i}}{\partial t} + \frac{\partial n_{p,i} u_{p,i}}{\partial x} = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad (12)$$

состояния идеального газа:

$$p = \rho_g R_g T_g. \quad (13)$$

Начальные условия:

$-\infty < x < 0$:

$$T_c(x, 0) = T_0, \quad \eta(x, 0) = 0,$$

$0 \leq x < \infty$:

$$T_g(x, 0) = T_{p,i}(x, 0) = T_b, \quad \rho_{ox}(x, 0) = 0,$$

$$\rho_{p,i}(x, 0) = 0, \quad \rho_g(x, 0) = p / (R_g T_b), \quad (14)$$

$$\rho_{B_2O_3,i}^k(x, 0) = \rho_{B_2O_3}^g(x, 0) = 0,$$

$$u_g(x, 0) = u_{p,i}(x, 0) = 0, \quad n_{p,i}(x, 0) = 0.$$

Граничные условия на поверхности топлива при $x = 0$:

$$\lambda_g \frac{T_g(0, t)}{\partial x} = \lambda_c \frac{T_c(0, t)}{\partial x} + L_c \rho_f V_c,$$

$$\frac{\partial \rho_{B_2O_3,i}^k(0, t)}{\partial x} = 0,$$

$$\varphi_{ox} V_c \rho_c = D_g \frac{\partial \rho_{ox}(0, t)}{\partial x} + u_g(0, t) \rho_{ox}(0, t),$$

$$D_g \frac{\partial \rho_{B_2O_3}^g}{\partial x} + u_g(0, t) \rho_{B_2O_3}^g = 0, \quad (15)$$

$$\rho_g(0, t) = \frac{p_g}{R_g T_g(0, t)}, \quad n_{p,i}(0, t) = \frac{\rho_{p,i}(0, t)}{(4/3) \pi r_{b,i}^3 \rho_p^0},$$

$$\varphi_B \rho_c V_c \delta_i = \rho_{p,i}(0, t) u_{p,i}(0, t),$$

$$T_{p,i}(0, t) = T_g(0, t), \quad \rho_{p,i}(0, t) = \varphi_B \rho_c \delta_i,$$

$$(1 - \varphi_B) \rho_c V_c = \rho_g(0, t) u_g(0, t).$$

Граничные условия на границе $x = -\infty$:

$$\frac{\partial T_c(\infty, t)}{\partial x} = 0, \quad \eta(\infty, t) = 0, \quad (16)$$

на границе $x = \infty$:

$$p(\infty, t) = p, \quad \frac{\partial T_g(\infty, t)}{\partial x} = 0,$$

$$\frac{\partial a_{ox}(\infty, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial a_{B_2O_3}^g(\infty, t)}{\partial x} = 0. \quad (17)$$

В уравнениях (1)–(17) приняты обозначения: ρ — плотность, u — скорость, V_c — скорость горения СТТ, T — температура, t — время, Q — тепловой эффект реакции, E — энергия активации, G — скорость изменения массы частиц при горении или окислении, k_{0i} — константа скорости химической реакции в продуктах газификации СТТ, k_c — константа скорости химической реакции разложения окислителя в конденсированной фазе смесового твердого топлива, $\alpha_p = \text{Nu}_p \lambda_g / (2r_p)$ — коэффициент теплообмена газа с частицами, α_i — стехиометрические коэффициенты реакций кислорода с горючими компонентами (частицами и газом), n_p — количество частиц в единице объема, S_p — площадь поверхности частицы, $\varepsilon_g = p_g / (\rho_g(\gamma - 1))$ — внутренняя энергия газа, $\varepsilon_p = c_p T_p$ — внутренняя энергия частиц, $\gamma = c_{p,g} / c_{v,g}$ — показатель адиабаты, $c_{p,g}$, $c_{v,g}$ — удельная теплоемкость газа при постоянных давлении и объеме соответственно, $\lambda_g = \lambda_{g,0} (T_g / T_0)^{2/3}$ — теплопроводность газа, $D_g = \lambda_g (T_g) / c_{p,g} \rho_g$ — коэффициент диффузии газа (принято, что число Льюиса $\text{Le} = D_g (T_g) / (\lambda_g (T_g) / c_{p,g} \rho_g) = 1$), τ_{fr} — сила трения, a_{ox} — массовая доля окислителя в газе, $a_{\text{В}_2\text{O}_3}^g$ — массовая доля газообразного оксида бора, η — глубина разложения окислителя в составе СТТ, x — координата, p_g — давление газа, p — давление вдали от поверхности горения, L_c — теплота испарения связки, δ_i — доля частиц i -й фракции в общей массе частиц в СТТ, $r_{p,i} = [3\rho_p / (4\pi n_{p,i} \rho_p^0)]^{1/3}$ — радиус частицы, $r_{\text{В}}$ — размер бора в частице, $r_{\text{В}} = \left[\left(\frac{\mu_{\text{В}} + (3/2)\mu_{\text{O}}}{\mu_{\text{В}}} r_{\text{В},0}^3 - \frac{\rho_p}{(4/3)\pi n_{p,i} \rho_p^0} \right) \frac{2\mu_{\text{В}}}{3\mu_{\text{O}}} \right]^{1/3}$ (на этапе окисления частицы), $r_{\text{В}} = r_p$ (на этапе гетерогенного горения частицы бора), μ — молярная масса, R_u — универсальная газовая постоянная, R_g — газовая постоянная. Индексом b отмечены начальные значения параметров состояния, p — параметры частиц, g — параметры газа, c — параметры СТТ, ox — окислитель, В — бор, i — номер фракции частиц.

Слагаемые, определяющие скорости изменения массы частиц бора i -й фракции за счет гетерогенных реакций на поверхности частиц ($G_{1,i}, G_{2,i}$), окисления частиц i -й фракции с образованием конденсированного оксида $\text{В}_2\text{O}_3$ ($G_{3,i}$), испарения расплава оксида $\text{В}_2\text{O}_3$ с поверхности частиц i -й фракции ($G_{4,i}$), представлены в работах [8, 12]:

$$\begin{aligned} G_{1,i} &= \frac{k_{01} e^{-E_{a,1}/(R_u T_{p,i})} \beta_{p,i}}{k_{01} e^{-E_{a,1}/(R_u T_{p,i})} + \beta_{p,i}} n_{p,i} \rho_{ox} S_{p,i}, \\ G_{2,i} &= \frac{k_{02} e^{-E_{a,2}/(R_u T_{p,i})} \beta_{p,i}}{k_{02} e^{-E_{a,2}/(R_u T_{p,i})} + \beta_{p,i}} n_{p,i} \rho_{ox} S_{p,i}, \\ G_{3,i} &= \beta_{p,i}^{\text{eff}} n_{p,i} \rho_{ox} S_{p,i}, \\ \beta_{p,i}^{\text{eff}} &= \left[\frac{r_{p,i}}{D_g} + \frac{r_{\text{В},i}^2 (1/r_{\text{В},i} - 1/r_{p,i})}{D_d e^{-E_d/(R_u T_{p,i})}} \right]^{-1}, \\ G_{4,i} &= n_{p,i} \beta_{p,i} (\rho_{sv,i} - \rho_{\text{В}_2\text{O}_3}^g), \\ \rho_{sv,i} &= \frac{1}{R_u T_g} \left(p_g \exp \left(-\frac{L}{R_u T_{p,i}} + \frac{L}{R_u T_{\text{boil}}} \right) \mu_g \right), \end{aligned}$$

где D_d — коэффициент в зависимости диффузии от температуры, E_d — энергия активации диффузии, $\beta_{p,i}$ — коэффициент массоотдачи [15], L — теплота парообразования, T_{boil} — температура кипения оксида бора.

Скорость изменения массовой концентрации окислителя при горении в газовой фазе также находили по формуле из [8, 12]:

$$G_5 = \rho_{ox} k_{05} \exp \left(\frac{-E_5}{R_u T_g} \right).$$

Выражение для силы трения между частицами и газом имеет вид

$$\tau_{fr,i} = n_{p,i} F_{fr,i},$$

где $F_{fr,i} = C_{fr,i} S_{m,i} \rho_g (u_g - u_{p,i}) |u_g - u_{p,i}| / 2$ — сила взаимодействия одиночной частицы i -й фракции с газом, $C_{fr,i} = 24(1 + 0.15 \text{Re}_i^{0.682}) / \text{Re}_i$ — коэффициент трения, $\text{Re}_i = 2\rho_g r_{p,i} |u_g - u_{p,i}| / \eta_g$ — число Рейнольдса, $S_{m,i}$ — площадь миделева сечения частиц i -й фракции, η_g — коэффициент динамической вязкости газа.

Коэффициент теплообмена между газом и частицами вычисляется по эмпирическим зависимостям для числа Нуссельта:

$$\alpha_{p,i} = \lambda_g \text{Nu}_{p,i} / r_{p,i},$$

где

$$\text{Nu}_{p,i} = 2 + \sqrt{(0.664\sqrt{\text{Re}_i})^2 + (0.037 \text{Re}_i^{0.8})^2}$$

— число Нуссельта для частиц i -й фракции.

При записи уравнений (1)–(17) за координату $x = 0$ принималась поверхность СТТ. Топливо движется со скоростью горения V_c . Скорость горения V_c и температура поверхности топлива T_c определялись из решения задачи для СТТ (1), (2).

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ

Система уравнений (1)–(17) решалась численно. Использовались алгоритмы распада произвольного разрыва С. К. Годунова для газа [16] и А. Н. Крайко [17] для частиц. Шаг по пространству задавался равным $\Delta h_{\text{const}} = 2.5 \cdot 10^{-7}$ м. Шаг по времени определялся из условия устойчивости

$$\Delta t < \frac{\Delta h_{\text{const}}}{\max [c + |u_g|]},$$

где c — скорость звука в газе.

Использовался следующий алгоритм вычисления значений неизвестных на $(n + 1)$ -м временном слое (счет шага по времени). Вначале решаются уравнения (1), (2) на новом временном слое. В качестве линейной скорости горения V_c принимается скорость движения изолинии глубины разложения окислителя в твердой фазе СТТ $\eta = 0.99$ (по достижении такой глубины превращения окислитель СТТ газифицируется). Линейная скорость горения СТТ V_c определяется из решения уравнения (2) итерационным путем [13]. Выбирается «пробное» значение скорости V_c (обычно в качестве него принимается величина с n -го временного слоя). Вычисляется поле значений глубины превращения η_k^{n+1} . Затем полученное значение η в точке разностной сетки m , которая находится на поверхности конденсированного вещества, $\eta_m^{n+1} = \eta(x_s, t)$, сравнивается со значением $\eta = 0.99$. Если $\eta_m^{n+1} > 0.99$, то значение V_c увеличивается на заданную долю от ее первоначальной величины; если $\eta_m^{n+1} < 0.99$, то значение V_c уменьшается. При выполнении равенства $\eta_m^{n+1} = 0.99$ с заданной точностью скорость V_c найдена. С использованием найденной скорости горения V_c и определенной из численного решения температуры на поверхности твердого топлива $T_S = T_c(0, t)$ из граничных условий (15) определяются потоки массы частиц бора, окислителя и газа, потоки энергии и импульса газа и частиц на границе $x = 0$.

После определения потоков в первой ячейке вычисляются потоки импульса, энергии и массы компонентов газозвеси на границах внутренних ячеек расчетной области. На правой границе расчетной области используется алгоритм расчета распада разрыва в параметрах газа на границе с внешней средой с заданным давлением. После определения потоков по явной разностной схеме рассчитываются значения параметров (плотность, скорость,

Состав порошка бора

Номер фракции частиц i	Радиус частиц $r_{0,i}$, мкм	Массовая доля δ_i частиц i -й фракции
1	0.73	0.007
2	0.91	0.012
3	1.17	0.02
4	1.5	0.026
5	1.93	0.039
6	2.47	0.075
7	3.16	0.096
8	4.07	0.113
9	5.29	0.149
10	7	0.14
11	9.7	0.111
12	14.97	0.136
13	29.27	0.076

давление газа, температура, скорость, массовые концентрации частиц каждой фракции) на $(n + 1)$ -м временном слое. Счет шага по времени повторяется необходимое количество раз. Расчеты проводятся до установления стационарного распределения параметров среды в расчетной области.

Проверка алгоритма решения задачи осуществлялась путем контроля выполнимости законов сохранения, проверки сеточной сходимости. Проверка достоверности получаемых результатов проводилась путем сравнения с экспериментальными данными и описана в работе [8]. В частности, подбирались параметры реакции в газовой фазе такие, чтобы скорость горения СТТ без добавления порошка металла при давлении 100 атм составляла 9 мм/с, при этом конечная температура продуктов горения равнялась $2600 \div 2700$ К.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Численное решение задачи (1)–(17) выполнено при следующих значениях физических величин [8]: $Q_1 = 31$ МДж/кг, $Q_2 = -1.3$ МДж/кг, $Q_3 = 3.6$ МДж/кг, $Q_4 = 0.3$ МДж/кг, $k_{01} = 10^3$ м/с, $k_{02} = 10^5$ м/с, $L = 0.36$ МДж/моль, $L_c = 0.3$ МДж/кг, $E_1 = 112$ кДж/моль, $E_2 = 252$ кДж/моль,

$E_d = 10$ кДж/моль, $\alpha_1 = 2.18$, $\alpha_2 = 2.18$, $\alpha_3 = 2.18$, $R_u = 8.31$ Дж/(моль·К), $D_d = 1.89 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $c_{p,g} = 1065$ Дж/(кг·К), $c_{v,g} = 768.2$ Дж/(кг·К), $\lambda_{g,0} = 0.03$ Вт/(м·К), $\mu_B = 11 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $\mu_O = 16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $c_p = 1293$ Дж/(кг·К), $\rho_p^0 = 2700$ кг/м³, $\eta_g = 2 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $T_{p,boil} = 2133$ К, $Q_5 = 3$ МДж/кг, $k_{05} = 8.4 \cdot 10^8$ с⁻¹, $E_5 = 188$ кДж/моль. Теплофизические и кинетические характеристики СТГ задавались равными $Q_c = 0.7$ МДж/кг, $k_c = 6.3 \cdot 10^8$ с⁻¹, $E_c = 100$ кДж/моль, $\lambda_c = 0.25$ Вт/(м·К). Доля окислителя в составе СТГ задавалась равной $\varphi_{ox} = 64$ %, доля связки — $\varphi_f = 19.7$ %, доля бора определялась выражением $\varphi_B = 1 - \varphi_{ox} - \varphi_f$. Плотность СТГ определялась через его состав $\rho_c = (\varphi_{ox}/\rho_{ox} + \varphi_f/\rho_f + \varphi_B/\rho_p)^{-1}$, где $\rho_{ox} = 1950$ кг/м³, $\rho_f = 1270$ кг/м³. Давление газа над поверхностью горения варьировалось в диапазоне 3.0 ÷ 10.0 МПа. Для учета эффекта агломерации использовались экспериментальные данные по дисперсности и полноте сгорания конденсированных продуктов сгорания, полученные в лаборатории горения конденсированных систем Института химической кинетики и горения СО РАН. Исследуемый состав состоял из бидисперсного перхлората аммония (64.6 % (мас.)), инертного связующего СКДМ-80 (19.7 % (мас.)) и добавки порошка бора (15.7 % (мас.)). Для получения экспериментальных данных по скорости горения и характеристикам конденсированных продуктов сгорания использовалась оригинальная методика отбора проб [18]. Тушение частиц осуществлялось вблизи поверхности горения. Эксперименты по отбору продуктов сгорания выполнялись при давлении 4.5 МПа. Для отобранных продуктов, состоящих из частиц агломератов и мелких оксидных частиц, получены функции распределения массы частиц по размерам в диапазоне от 0.5 мкм до сотен микрометров. Фракционный состав используемого в расчете порошка бора на выходе с поверхности горения приведен в таблице. Полученные данные по полноте сгорания образцов и дисперсности конденсированных продуктов сгорания были использованы для расчета скорости горения СТГ при различных давлениях газа над поверхностью топлива.

Результаты расчета по модели (1)–(17) представлены на рис. 2–4. На рис. 2 приведены распределения температур газа и частиц,

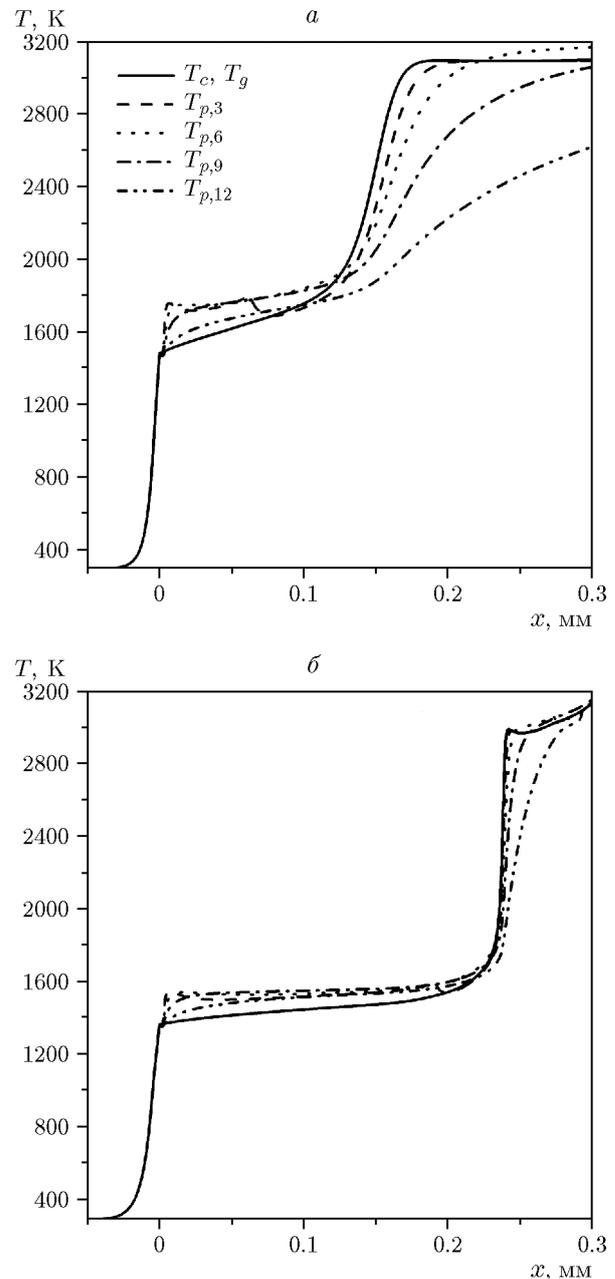


Рис. 2. Распределения температур газа и частиц при $p = 10$ МПа (а) и 4 МПа (б)

а также распределение температуры в установившемся режиме горения СТГ, содержащего частицы бора, при давлениях 10 МПа (рис. 2, а) и 4 МПа (рис. 2, б). Распределение температуры в СТГ представлено сплошной линией в интервале -0.5 мм $< x < 0$, после координаты $x = 0$ сплошная линия соответствует температуре газа. Согласно рис. 2 при низких давлениях фронт пламени отдален от поверхности

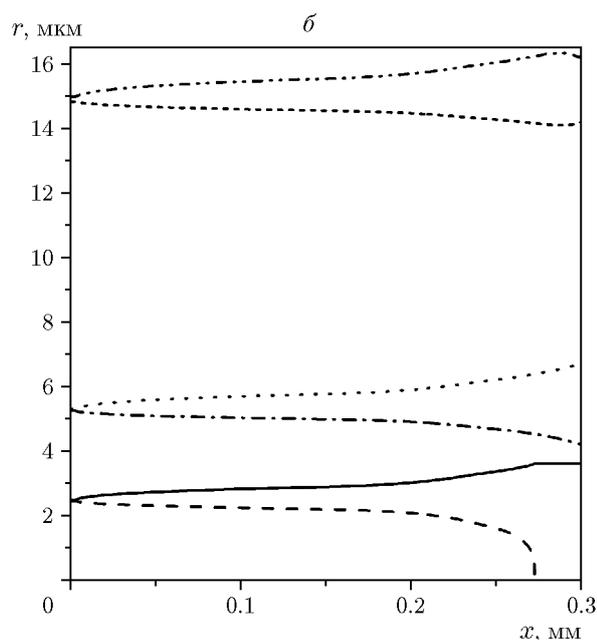
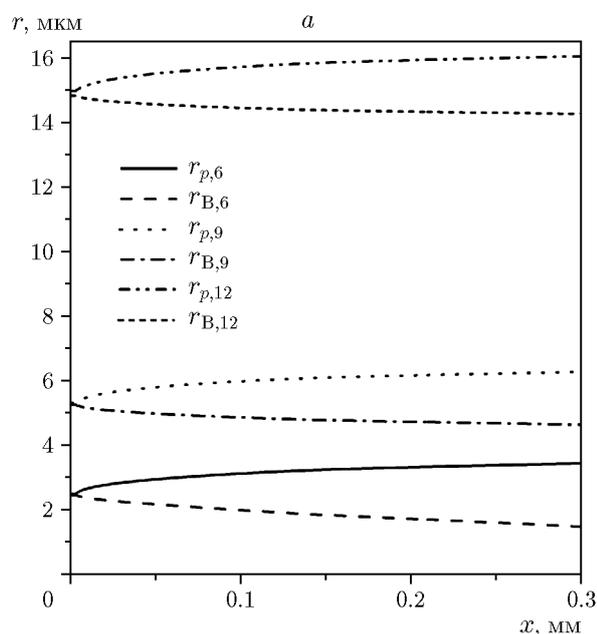


Рис. 3. Радиусы частиц и бора, содержащегося в частицах, при $p = 10$ МПа (*a*) и 4 МПа (*б*)

топлива. С поверхности СТТ выходят нагретые частицы и истекают подогретые компоненты газовой фазы. Температура нагретых частиц превышает температуру начала окисления. Формирование оксидной пленки сопровождается выделением тепла. За счет конвективного теплообмена и теплопроводности газ нагревается до температуры начала химических реакций. На некотором расстоянии от поверх-

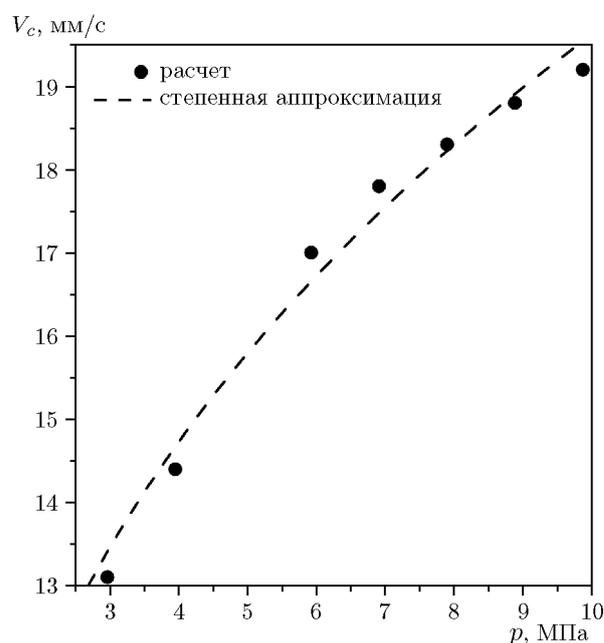


Рис. 4. Зависимость линейной скорости горения СТТ, содержащего полидисперсный порошок бора, от давления газа над поверхностью горения

ности топлива происходит воспламенение газообразных продуктов газификации топлива. Выделение тепла от горения газа приводит к интенсификации окисления частиц. Частицы бора сгорают в режиме окисления через слой оксида на его поверхности. Бор в частицах окисляется и формирует оксидный слой на поверхности частицы. Оксидная пленка с поверхности частиц не испаряется из-за высокого давления газа.

На рис. 3 представлены распределения радиуса частиц и радиуса бора в частицах, соответствующие установившемуся режиму горения, при $p = 10$ МПа (рис. 3, *a*) и $p = 4$ МПа (рис. 3, *б*). Стоит отметить картину распределения радиусов частиц и бора в частицах фракции 6 с начальным радиусом 2.47 мкм. При $p = 10$ МПа на представленном участке частицы не успевают полностью окислиться, при $p = 4$ МПа частицы окисляются полностью. При этом весь бор расходуется на формирование оксидного слоя, размер частиц увеличивается, бор выгорает полностью. Более крупные частицы бора вблизи поверхности топлива начинают окисляться, их сгорание происходит далеко от поверхности топлива.

Из параметров, представленных на рис. 2, 3, была рассчитана скорость горения СТТ, со-

держашего порошок бора: при $p = 10$ МПа скорость составила 19.2 мм/с, при $p = 4$ МПа — 14.4 мм/с.

Зависимость скорости горения СТТ от давления приведена на рис. 4: результаты численного расчета и аппроксимация расчета степенным законом $V_c = Ap^\nu$ (V_c — [мм/с], p — [МПа]), показатель степени $\nu = 0.313$.

В статье [8] моделирование горения СТТ, содержащего частицы бора, было выполнено для монодисперсного порошка бора и при использовании модели Германса для описания процесса разложения СТТ. Скорости горения СТТ, определенные в [8], были ниже, так как порошок бора принимался монодисперсным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена сопряженная физико-математическая модель горения СТТ, содержащего полидисперсный порошок бора, в которой над поверхностью твердого топлива учитываются газодинамические процессы в двухфазной, многоскоростной, многотемпературной теплопроводной среде и процессы теплопереноса и реагирования в твердом топливе. На поверхности топлива ставятся граничные условия равенства тепловых и массовых потоков компонентов топлива.

Определены распределения температуры и радиуса частиц, а также радиуса бора в частицах вблизи поверхности топлива. Показано, что при низких давлениях зона интенсивных химических реакций в продуктах газификации СТТ отодвигается от поверхности СТТ, меняется скорость окисления мелкодисперсных частиц бора. Получена расчетно-теоретическая зависимость линейной скорости горения СТТ, содержащего частицы бора, от давления газа над поверхностью топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ягодников Д. А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
2. Архипов В. А., Басалаев С. А., Кузнецов В. Т., Порязов В. А., Федорычев А. В. Моделирование процессов зажигания и горения борсодержащих твердых топлив // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57, № 3. — С. 58–64. — DOI: 10.15372/FGV20210305.
3. Буланин Ф. К., Сидоров А. Е., Полегаев Н. И., Стариков М. А., Шевчук В. Г. Интенсификация воспламенения алюминия и бора // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57, № 2. — С. 68–74. — DOI: 10.15372/FGV20210207.
4. Пивкина А. Н., Мееров Д. Б., Моногаров К. А., Фролов Ю. В., Муравьев Н. В. Перспективы использования порошков бора в качестве горючего. II. Влияние добавок алюминия, магния и их соединений на термическое поведение оксида бора // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 2. — С. 28–36. — DOI: 10.15372/FGV20200205.
5. Мееров Д. Б., Моногаров К. А., Муравьев Н. В., Фоменков И. В., Васильев А. Л., Шишов Н. И., Пивкина А. Н. Перспективы использования порошков бора в качестве горючего. III. Влияние полимерного связующего на состав конденсированных продуктов газификации борсодержащих модельных композиций // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57, № 5. — С. 42–54. — DOI: 10.15372/FGV20210504.
6. Лю Цз.-Чж., Лян Д.-Л., Сяо Цз.-У., Чэнь Б.-Х., Чжан Я. В., Чжоу Цз.-Х., Цэнь К.-Ф. Состав и характеристики первичных продуктов горения топлив на основе бора // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 1. — С. 64–74. — DOI: 10.15372/FGV20170109.
7. 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. — DOI: 10.15372/FGV20200109.
8. Порязов В. А., Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Архипов В. А. Численное моделирование горения смесового твердого топлива, содержащего порошок бора // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 2. — С. 78–87. — DOI: 10.15372/FGV20220209.
9. Порязов В. А., Крайнов А. Ю. Расчет скорости горения металлизированного смесового твердого топлива с учетом распределения агломератов по размерам // Инж.-физ. журн. — 2016. — Т. 89, № 3. — С. 568–574.
10. Hermance C. E. A model of composite propellant combustion including surface heterogeneity and heat generation // AIAA J. — 1966. — V. 4, N 9. — P. 1629–1637. — DOI: 10.2514/3.55284.
11. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987.
12. Крайнов А. Ю., Крайнов Д. А., Моисеева К. М., Порязов В. А., Хакимов А. А. Математическое моделирование горения газозвеси порошка бора // Инж.-физ. журн. — 2021. — Т. 94, № 2. — С. 360–371.

13. **Крайнов А. Ю., Порязов В. А.** Численное моделирование погасания пороха Н при резком сбросе давления на основе сопряженной модели горения // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 6. — С. 47–52. — DOI: 10.15372/FGV20150607.
14. **King M. K.** Boron particle ignition in hot gas streams // Combust. Sci. Technol. — 1974. — V. 8, N 5-6. — P. 255–273. — DOI: 10.1080/00102207308946648.
15. **Франк-Каменецкий Д. А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987.
16. **Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П.** Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976.
17. **Крайко А. Н.** О поверхностях разрыва в среде, лишенной «собственного» давления // Прикл. математика и механика. — 1979. — Т. 43, № 3. — С. 500–510.
18. **Глотов О. Г., Зырянов В. Я.** Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. I. Методика исследования эволюции частиц дисперсной фазы // Физика горения и взрыва. — 1995. — Т. 31, № 1. — С. 74–80.

Поступила в редакцию 02.02.2022.

После доработки 14.03.2022.

Принята к публикации 25.05.2022.
