

УДК 536.46+662.61

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЗАМОРОЖЕННОЙ СУСПЕНЗИИ НАНОДИСПЕРСНОГО АЛЮМИНИЯ

А. Ю. Крайнов, В. А. Порязов

Томский государственный университет, 634050 Томск, akrainov@ftf.tsu.ru

Представлена математическая модель горения смесового твердого топлива ALICE (замороженной суспензии нанодисперсного алюминия в воде), в которой учитывается горение наночастиц алюминия в парах воды, движение продуктов сгорания, отставание скорости частиц от газа. Результаты расчета скорости горения соответствуют экспериментальным данным по зависимости скорости горения ALICE от давления.

Ключевые слова: замороженная суспензия нанодисперсного алюминия в воде, скорость горения, процессы в газовой фазе, математическое моделирование.

DOI 10.15372/FGV20160207

Одним из направлений создания высокоэнергетических веществ является использование порошка алюминия различной дисперсности в качестве горючего в смесевых составах. Большое внимание уделяется нанодисперсному порошку [1]. При этом решаются также задачи создания смесевых твердых топлив, не загрязняющих окружающую среду, изучается, какие компоненты твердого топлива дают меньшее количество вредных веществ в продуктах сгорания.

В [2] проведено экспериментальное исследование горения ультрадисперсного алюминия, полученного электровзрывом проводника [3], в смеси с водой, загущенной до состояния геля водорастворимым полимером полиакриламидом. В [4] для удержания нанодисперсного порошка алюминия в смеси с водой суспензию замораживали. Полученное смесовое твердое топливо авторы назвали nAl/ice или ALICE. Экспериментальное исследование высокоэнергетических веществ, состоящих из ультрадисперсного порошка алюминия и воды [3] и нанодисперсного алюминия и льда [4], показало, что они могут гореть в послойном режиме, определены линейные скорости их горения в зависимости от давления. В работе [4] также исследовано горение топлива ALICE в модельной камере ракетного двигателя и проведен пуск маломерной ракеты с двигателем, работающим

на топливе ALICE.

В настоящей работе выполнено математическое и численное моделирование горения смесового состава в виде замороженной суспензии нанодисперсного порошка алюминия в воде (ALICE).

При горении такой замороженной суспензии во фронте прогрева перед поверхностью испарения воды происходят разогрев льда до температуры плавления, его плавление, разогрев слоя воды до температуры кипения и испарение воды на поверхности жидкости. Вместе с парами воды в газовую фазу выносятся частицы алюминия и реагируют в газовой фазе с парами воды, образуя газообразный водород и оксид алюминия.

Известно, что давление насыщенных паров зависит от температуры по закону Клапейрона — Клаузиуса. Теплота испарения воды уменьшается с увеличением температуры. Удельные теплоемкости паров воды и водорода отличаются в несколько раз. Поэтому их необходимо учитывать при моделировании теплопереноса в газовой фазе и теплообмена частиц алюминия с газовой фазой в процессе горения.

Для моделирования горения замороженной суспензии нанодисперсного порошка алюминия в воде использовалась модель горения летучих горючих веществ, разработанная А. Ф. Белявым применительно к нитрогликолю [5].

В работе сделан ряд предположений. Линейная скорость горения замороженной суспензии нанодисперсного порошка алюминия в воде определяется скоростью испарения воды с поверхности. Частицы алюминия представля-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-03-02578а).

ют собой шарики, размер частиц одинаков, и они распределены в объеме льда равномерно. С ними реагируют пары воды. Продуктами реакции являются оксид алюминия, остающийся на поверхности частицы алюминия, и водород ($2\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2$). Скорость горения частиц алюминия описывается на основе экспериментальных данных [6–8]. Теплообмен между частицами и газом происходит по закону Ньютона. Частицы движутся под действием силы трения со стороны газа. Из-за малой объемной концентрации частиц в газе их движение не оказывает влияния на движение газа. Отсутствуют агломерация частиц на поверхности конденсированной фазы и взаимодействие частиц друг с другом в газовой фазе. Горение происходит в изобарических условиях, давление не зависит от расстояния до поверхности горения.

Математическая модель основана на моделях воспламенения и горения смесей газа и твердых частиц [9, 10] и моделях горения смесевых металлизированных твердых топлив [11, 12]. С учетом сделанных предположений математическая модель горения замороженной суспензии нанодисперсного порошка алюминия в воде, записанная в системе координат, связанной с поверхностью горения, имеет вид:

$$c_2\rho_2\left(\frac{\partial T_2}{\partial t} + u\frac{\partial T_2}{\partial x}\right) = \lambda_2\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + 4\pi\alpha r_k^2 n(T_3 - T_2), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u)}{\partial x} = -G, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_{\text{H}_2}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\text{H}_2} u)}{\partial x} = G\frac{\mu_{\text{H}_2}}{\mu_{\text{O}}}, \quad (3)$$

$$c_3\rho_3\left(\frac{\partial T_3}{\partial t} + w\frac{\partial T_3}{\partial x}\right) = -4\pi\alpha r_k^2 n(T_3 - T_2) + GQ_{\text{Al}}\frac{2\mu_{\text{Al}}}{3\mu_{\text{O}}}, \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w\frac{\partial w}{\partial x} = -\tau, \quad (6)$$

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

$$p = \rho_2\left(\frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} + \frac{m_{\text{H}_2}}{\mu_{\text{H}_2}}\right)RT_2 = \text{const}, \quad (8)$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\rho_2 - \rho_{\text{H}_2}}{\rho_2}, \quad m_{\text{H}_2} = \frac{\rho_{\text{H}_2}}{\rho_2}.$$

Здесь (1) и (4) — уравнения энергии для газовой фазы и частиц; (2) — уравнение сохранения массы газовой фазы, (3) — газообразных продуктов реакции, (5) — частиц; (6) — уравнение движения частиц; (7) — уравнение для числа частиц; (8) — уравнение состояния идеального газа, записанное для двухкомпонентной газовой смеси. Принятые обозначения: t — время; x — координата; T_2 — температура газовой смеси; T_3 — температура частиц; ρ_2 — плотность газа; ρ_{H_2} — парциальная плотность водорода; ρ_3 — приведенная плотность частиц (масса частиц в единице объема); n — число частиц в единице объема; u — скорость газа; w — скорость частиц; p — давление; r_k — радиус частицы; $m_{\text{H}_2\text{O}}$, m_{H_2} — массовые доли паров воды и водорода в газовой фазе; μ_{Al} , μ_{H_2} , $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ — молярные массы алюминия, молекул водорода, молекул воды; μ_{O} — атомная масса кислорода; c_2 — удельная теплоемкость при постоянном давлении смеси газов; λ_2 — коэффициент теплопроводности газа; α — коэффициент теплоотдачи; G — скорость изменения массы частиц при их горении; Q_{Al} — теплота сгорания алюминия в парах воды; R — универсальная газовая постоянная; τ — сила взаимодействия частиц с газом.

Координата $x = 0$ соответствует поверхности горения. Линейная скорость горения определяется скоростью испарения воды. Для этого мы использовали модель А. Ф. Беляева [5], разработанную для определения скорости горения испаряющихся взрывчатых веществ. На поверхности испарения выполняются законы сохранения потока массы воды

$$(1 - M_{\text{Al}})\rho_1 v = \rho_2 u|_{x=0} \quad (9)$$

и потока массы частиц алюминия

$$M_{\text{Al}}\rho_1 v = \rho_3 w|_{x=0}. \quad (10)$$

Здесь v — линейная скорость движения границы испарения воды, M_{Al} — массовая доля порошка алюминия в суспензии, ρ_1 — плотность замороженной суспензии нанопорошка алюминия в воде.

Температура воды на поверхности испарения равна температуре пара и температуре частиц:

$$T_3|_{x=0} = T_2|_{x=0} = T_v. \quad (11)$$

Температура насыщенного пара T_v над поверхностью испарения определяется из уравнения Клапейрона — Клаузиуса

$$p = A \exp\left(-\frac{L}{RT_v}\right).$$

Здесь L — удельная теплота испарения воды, A — константа.

Для определения константы A используем точку кипения воды при атмосферном давлении ($p_a = 1$ атм, $T_{v,a} = 373$ К). Тогда при заданном давлении p над поверхностью горения получаем выражение для температуры насыщенного пара:

$$T_v = \frac{L}{R \ln(p/p_a) + L/T_{v,a}}. \quad (12)$$

Поток тепла из газовой фазы на поверхность испарения расходуется на разогрев конденсированного вещества до температуры плавления льда и его плавление, на разогрев воды до температуры испарения и ее испарение:

$$\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \rho_1 v (c_1 T_2|_{x=0} - c_1 T_{1,0}) + \rho_1 (1 - M_{Al}) v (L + \Lambda), \quad (13)$$

где c_1 — удельная теплоемкость замороженной суспензии нанопорошка алюминия в воде, $T_{1,0}$ — начальная температура замороженной суспензии, Λ — удельная теплота плавления льда.

Плотность паров воды над поверхностью конденсированной фазы определяется из уравнения состояния идеального газа:

$$\rho_2|_{x=0} = \frac{\mu_{H_2O} p}{RT_2|_{x=0}}, \quad p = \text{const}.$$

Количество частиц в единице объема определяется из соотношения

$$n|_{x=0} = \frac{\rho_3|_{x=0}}{(4/3)\pi r_{Al,0}^3 \rho_k},$$

где $r_{Al,0}$ — начальный радиус частицы алюминия, ρ_k — плотность вещества частицы. Газообразных продуктов реакции вблизи поверхности испарения воды нет: $\rho_{H_2}|_{x=0} = 0$. На границе $x = \infty$ ставится граничное условие

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\infty} = 0. \quad (14)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} T_2(x, 0) &= T_{ign}, & T_3(x, 0) &= T_{ign}, \\ \rho_2(x, 0) &= \frac{\mu_{H_2O} p}{RT_2(x, 0)}, & \rho_{H_2}(x, 0) &= 0, \\ \rho_3(x, 0) &= 0, & u(x, 0) &= 0, \\ w(x, 0) &= 0, & n(x, 0) &= 0, \end{aligned} \quad (15)$$

T_{ign} — температура воспламенения частицы алюминия.

Определим величины τ и G , стоящие в правых частях уравнений системы (1)–(8). Сила взаимодействия частиц алюминия с газом вычисляется следующим образом:

$$\tau = \frac{F}{4/3\pi r_k^3 \rho_k}.$$

Здесь сила сопротивления сферы при обтекании определяется по формуле

$$F = C_R S_m \frac{\rho_2 (w - u) |u - w|}{2},$$

коэффициент сопротивления — по эмпирической формуле [13]

$$C_R = \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.15 \text{Re}^{0.682}), \quad \text{Re} = \frac{2r_k \rho_k |u - w|}{\eta},$$

где S_m — площадь миделева сечения, η — коэффициент динамической вязкости, Re — число Рейнольдса.

Коэффициент теплоотдачи определяется как

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda_2}{2r_k}, \quad \text{Nu} = 2 + \sqrt{\text{Nu}_l^2 + \text{Nu}_t^2}, \quad (16)$$

где Nu — число Нуссельта, $\text{Nu}_l = 0.664 \text{Re}^{0.5}$, $\text{Nu}_t = 0.037 \text{Re}^{0.8}$ [13].

Для определения скорости изменения массы частиц при горении G примем, что продуктом реакции алюминия с водяным паром является оксид Al_2O_3 , остающийся на частице; плотность частицы в процессе горения не меняется. Начальную массу частицы алюминия обозначим $m_{Al,0}$, ее текущее значение в процессе горения — m_k , массу несгоревшей части алюминия в частице обозначим m_{Al} . При частичном выгорании алюминия в частице

$$m_k = m_{Al} + \frac{\mu_{Al} + (3/2)\mu_O}{\mu_{Al}} (m_{Al,0} - m_{Al}).$$

При постоянной плотности частицы

$$m_k = \frac{4}{3} \pi \rho_k r_k^3 = \frac{\rho_3}{n}. \quad (17)$$

Масса частиц в единице объема равна $M_k = nm_k$, а производная по времени от нее — это величина скорости расходования массы окислителя G :

$$G = -\frac{3\mu_O}{2\mu_{Al}} n \rho_k 4\pi r_{Al}^2 \frac{dr_{Al}}{dt}. \quad (18)$$

Экспериментальные данные [6–8] показывают, что время сгорания частицы алюминия в водяном паре определяется ее начальным диаметром $d_{Al,0}$ как $bd_{Al,0}^2$, где b — константа. Будем предполагать, что характер этой зависимости такой же и в случае наноразмерных частиц алюминия (обоснование см. в работе [14]). Продифференцируем правую и левую части приведенной выше формулы и после элементарных преобразований запишем выражение $\frac{dr_{Al}}{dt} = -k_{Al} \frac{1}{r_{Al}}$. Подставляя его в (18), получаем выражение для скорости изменения массы частиц при их горении:

$$G = \frac{3\mu_O}{2\mu_{Al}} n \rho_k 4\pi r_{Al} k_{Al}, \quad (19)$$

где k_{Al} — константа.

Размер оставшейся части алюминия в частице r_{Al} определяется из числа частиц в единице объема n и приведенной плотности частиц ρ_3 по формуле, полученной из (17), с использованием равенства $m_k = \frac{4}{3} \pi \rho_k \left(r_{Al}^3 + \frac{\mu_{Al} + (3/2)\mu_O}{\mu_{Al}} (r_{Al,0}^3 - r_{Al}^3) \right)$:

$$r_{Al} = \left[\left(\frac{\mu_{Al} + (3/2)\mu_O}{\mu_{Al}} r_{Al,0}^3 - \frac{\rho_3}{(4/3)\pi n \rho_k} \right) \frac{2\mu_{Al}}{3\mu_O} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (20)$$

При выводе (20) предполагалось для упрощения, что оксид алюминия, остающийся в частице, имеет форму шарового слоя. Это предположение вводится для определения текущего радиуса шарика алюминия в процессе его горения и никак не влияет на скорость горения

частицы алюминия, поскольку она выбрана с учетом экспериментальных данных.

Система (1)–(8) с граничными и начальными условиями (10)–(15) и выражениями для правых частей решалась численно методами, изложенными в [11, 12]. Уравнение (1) решалось по неявной разностной схеме методом прогонки. Линейная скорость горения v (скорость движения конденсированной фазы) есть скорость движения изотермы, соответствующей температуре кипения воды при заданном давлении. Она определяется из уравнения (1) с граничными условиями (11), (13), (14) итерационным путем. Выбирается «пробное» значение скорости v (обычно это величина с n -го временного слоя). Вычисляется поле температуры газовой фазы $T_{2,k}^{n+1}$. Значение $T_{2,0}^{n+1}$ на поверхности испарения сравнивается со значением температуры кипения воды при заданном давлении p (12). Если $T_{2,0}^{n+1} > T_2|_{x=0} =$

$\frac{L}{R \ln(p/p_a) + L/T_v}$, то скорость v увеличивается на заданную долю от ее текущей величины, если $T_{2,0}^{n+1} < T_2|_{x=0}$ — уменьшается. При $T_{2,0}^{n+1} = T_2|_{x=0}$ с заданной точностью скорость v найдена. Плотность газа на $(n+1)$ -м временном слое определяется из уравнения состояния газа (8) через найденную температуру газа на $(n+1)$ -м временном слое ($T_{2,k}^{n+1}$) и заданное давление над поверхностью горения. Уравнения (3)–(7) решаются по явной разностной схеме с использованием аппроксимации конвективных слагаемых разностями против потока. Для обеспечения устойчивости численного решения используется условие устойчивости вида $\Delta t < \Delta x / \max[u_i]$, где Δt — шаг по времени, Δx — шаг по пространству, u_i — скорость в точках разностной сетки. Уравнение (2) аппроксимируется неявной разностной схемой с использованием разностей против потока. Из разностного аналога уравнения (2) при известной плотности на n -м и $(n+1)$ -м временных слоях бегущим счетом определяется скорость движения газовой фазы.

Система (1)–(15) решается в соответствии со следующим алгоритмом вычисления значений неизвестных на $(n+1)$ -м временном слое (счет шага по времени). По уравнению (1), записанному в разностной форме, вычисляются температура газа на $(n+1)$ -м временном слое и линейная скорость горения v . По уравнению (3) рассчитывается парциальная плотность во-

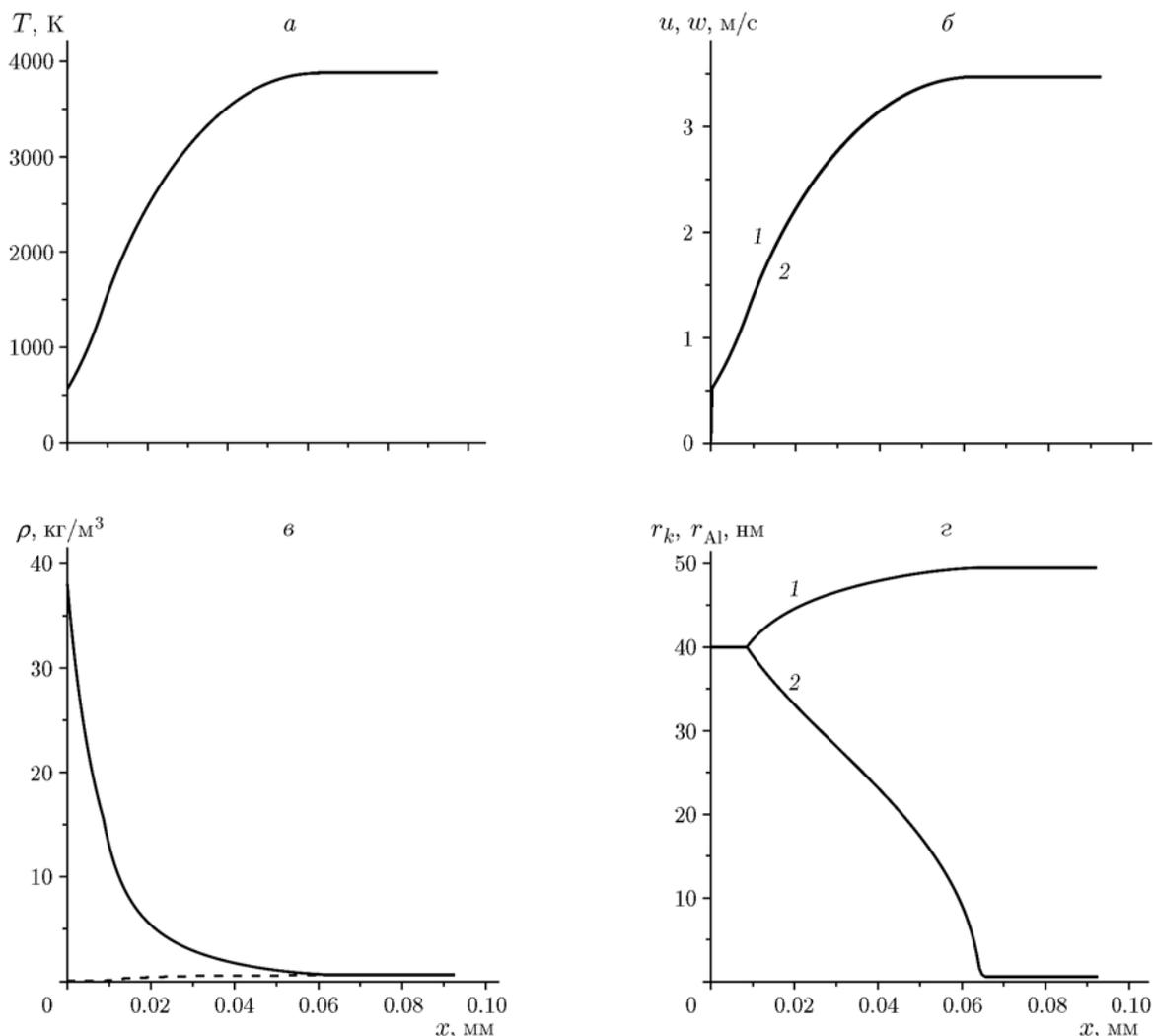


Рис. 1. Распределения температуры (*а*) газа и частиц, скорости движения (*б*) газа (1) и частиц (2), плотности (*в*) газа (сплошная линия) и парциальной плотности водорода (штриховая линия), радиусов (*г*) частиц (1) и несгоревшей части алюминия (2) ($p = 10$ МПа)

дорода — продукта реакции алюминия с водяным паром, по уравнению (8) — плотность газа при заданном давлении над поверхностью горения, по уравнению (2) — скорость газа. По уравнению (4) вычисляется температура частиц, по уравнению (5) — их плотность, по уравнению (6) — скорость движения частиц, по уравнению (7) — их количество в единице объема. Счет шага по времени повторяется необходимое количество раз. Расчеты проводятся до установления стационарного распределения параметров газодисперсной среды над поверхностью горения и линейной скорости горения.

На основе описанного алгоритма была разработана компьютерная программа. Проведение

исследования результатов расчетов на сходимость при уменьшении шага по пространству. Из полученных результатов выбран шаг по пространству, обеспечивающий сходимость результатов с погрешностью не более 0.3 %. В процессе расчетов контролировалась выполнимость законов сохранения массы и энергии, составившая 99.5 %. Исследование сходимости и определение параметров сетки выполнялись для каждого значения давления газа над поверхностью горения.

В ходе численного исследования горения замороженной суспензии нанодисперсного порошка алюминия в воде задавалась массовая концентрация порошка алюминия, соот-

ветствующая стехиометрической смеси алюминия с водой. Расчеты проводились при следующих значениях теплофизических величин: $\rho_1 = 1460 \text{ кг/м}^3$, $M_{\text{Al}} = 0.499$, $c_1 = c_{\text{H}_2\text{O}(l)}(1 - M_{\text{Al}}) + c_{\text{Al}}M_{\text{Al}}$, $c_{\text{H}_2\text{O}(l)} = 4185 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $c_{\text{Al}} = 903 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $c_{\text{H}_2\text{O}} = 2600 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $c_{\text{H}_2} = 14300 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $\rho_k = 2600 \text{ кг/м}^3$, $R = 8.31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$, $\eta = 0.00002 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\lambda_2 = 1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $k_{\text{Al}} = 1.2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, $T_{1,0} = 270 \text{ К}$, $Q_{\text{Al}} = 15.0 \text{ МДж/кг}$ [8], $\Lambda = 332400 \text{ Дж/кг}$, $L = 1712940 \text{ Дж/кг}$, $c_2 = m_{\text{H}_2\text{O}}c_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{H}_2}c_{\text{H}_2}$, $\mu_{\text{Al}} = 0.027 \text{ кг/моль}$, $\mu_{\text{O}} = 0.016 \text{ кг/моль}$, $\mu_{\text{H}_2} = 0.002 \text{ кг/моль}$, $r_{\text{Al},0} = 40 \text{ нм}$, $p = 4 \div 20 \text{ МПа}$.

Радиус частиц алюминия (40 нм) и давление над поверхностью горения ($4 \leq p \leq 20 \text{ МПа}$) приняты соответственно данным [4]. Наноразмерный порошок алюминия имеет оксидную пленку. По данным [7, 8] минимальная температура воспламенения частиц алюминия в водяном паре наблюдается при размере частицы $\approx 10 \text{ мкм}$ и возрастает при его уменьшении и увеличении. В работе [14] представлены результаты исследования сгорания частиц алюминия диаметром 80 нм в смеси кислорода с азотом (50 : 50 %) при температуре $1200 \div 2000 \text{ К}$. Так как данных о температуре воспламенения наноразмерных частиц алюминия в водяном паре при высоком давлении нет, в расчетах она принята равной 1400 К .

В [8] дана формула для времени сгорания частиц алюминия диаметром $150 \div 300 \text{ мкм}$ в парах воды, в которой определен коэффициент k_{Al} , используемый в формуле (19). Расчеты с этим значением коэффициента дают завышенную скорость горения замороженной суспензии нанодисперсного алюминия по сравнению с результатами экспериментальных измерений [4]. Поэтому в математической модели (1)–(20) коэффициент k_{Al} рассматривается как единственный для согласования результатов расчета с экспериментальными данными [4]. Экспериментальные зависимости скорости горения [4] замороженной суспензии нанодисперсного алюминия в воде от давления даны в интервале $4 \leq p \leq 20 \text{ МПа}$. Коэффициент k_{Al} выбран таким, чтобы расчетное значение скорости горения совпало с экспериментальным [4] при $p = 10 \text{ МПа}$. Полученное после согласования значение $k_{\text{Al}} = 1.2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ использовалось для расчета скорости горения при других давлениях.

Результаты расчетов представлены на

рис. 1 и 2. Из распределения параметров состояния среды над поверхностью испарения воды при горении замороженной суспензии при $p = 10 \text{ МПа}$ видно, что температура газа мало отличается от температуры частиц из-за малого размера последних (рис. 1, а). Она растет с удалением от поверхности испарения. Температура на поверхности испарения $T_2 = 570.4 \text{ К}$ существенно ниже температуры плавления алюминия. На удалении от поверхности $\approx 0.01 \text{ мм}$ температура частиц достигает температуры воспламенения и они начинают гореть. Тепло химической реакции передается газу и далее за счет теплопроводности — поверхности испарения воды. С удалением от поверхности испарения скорость газа также повышается (рис. 1, б), плотность газа уменьшается, растет парциальная плотность водорода (рис. 1, в), увеличивается размер частиц и снижается количество алюминия в частице (рис. 1, г). Так как массовая концентрация частиц алюминия выбрана стехиометрической, после сгорания частиц только водород содержится в газовой фазе (рис. 1, е).

На рис. 2 представлена зависимость линейной скорости горения замороженной суспензии нанодисперсного алюминия в воде от давления. Приведенные на рисунке экспериментальные данные аппроксимированы в [4] в виде зависимости $v_e = 0.7027p^{0.57019} \text{ [см/с]}$ (давление

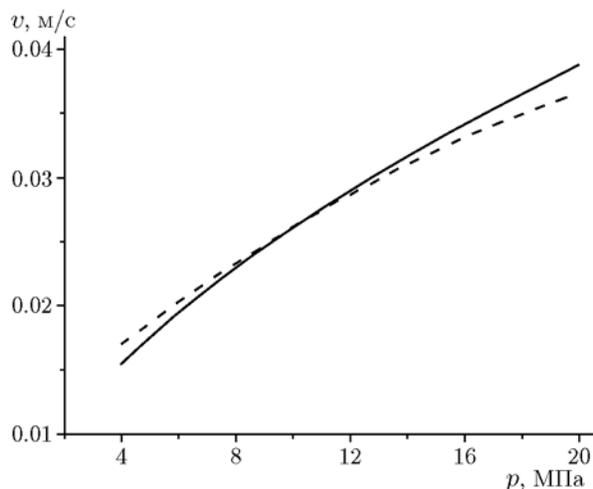


Рис. 2. Зависимость линейной скорости горения замороженной суспензии нанопорошка алюминия в воде от давления:

сплошная линия — расчет по модели (1)–(20), штриховая линия — аппроксимация [4] $v_e = 0.7027p^{0.57019} \text{ [см/с]}$

измеряется в МПа). Отличие результатов расчета скорости от экспериментальных составляет не более 8 %.

В целом, можно сказать, что разработанная математическая модель горения замороженной суспензии нанодисперсного алюминия в воде дает при разных давлениях значения скорости горения, хорошо согласующиеся с соответствующими экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика** и химия горения нанопорошков металлов в азотсодержащих газовых средах / под ред. А. А. Громова. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007.
2. **Иванов В. Г., Гаврилюк О. В., Глазков О. В., Сафронов М. Н.** Особенности реакции ультрадисперсного порошка алюминия с водой в режиме горения // *Физика горения и взрыва*. — 2000. — Т. 36, № 2. — С. 60–66.
3. **Яворовский Н. Я.** Получение ультрадисперсных порошков металлов методом электровзрыва проводника // *Изв. вузов. Физика*. — 1996. — Т. 39, № 4. — С. 114–135.
4. **Pourpoint T. L., Wood T. D., Pfeil M. A., Tsohas J., Son S. F.** Feasibility study and demonstration of an aluminum and ice solid propellant // *Intern. J. Aerospace Eng.* — 2012. — Article ID 874076. — doi:10.1155/2012/874076.
5. **Беляев А. Ф.** О горении нитрогликоля // *Теория горения порохов и взрывчатых веществ*. — М.: Наука, 1982. — С. 10–34.
6. **Бекстед М. В.** Анализ данных по времени горения частиц алюминия // *Физика горения и взрыва*. — 2005. — Т. 41, № 5. — С. 55–69.
7. **Гуревич М. А., Лапкина К. И., Озеров Е. С.** Предельные условия воспламенения частицы алюминия // *Физика горения и взрыва*. — 1970. — Т. 6, № 2. — С. 172–176.
8. **Ягодников Д. А.** Воспламенение и горение порошкообразных металлов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
9. **Медведев А. Е., Федоров А. В., Фомин В. М.** Описание воспламенения и горения смесей газа и твердых частиц методами механики сплошной среды // *Физика горения и взрыва*. — 1984. — Т. 20, № 2. — С. 3–9.
10. **Медведев А. Е., Федоров А. В., Фомин В. М.** Математическое моделирование воспламенения частиц металла в высокотемпературном потоке за ударной волной // *Физика горения и взрыва*. — 1982. — Т. 18, № 3. — С. 5–9.
11. **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.
12. **Порязов В. А., Крайнов А. Ю., Крайнов Д. А.** Математическое моделирование горения пороха Н с добавлением порошка алюминия // *Инж.-физ. журн.* — 2015. — Т. 88, № 1. — С. 93–101.
13. **Справочник по теплообменникам:** в 2 т. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — Т. 1.
14. **Федоров А. В., Шульгин А. В.** Точечная модель горения наночастиц алюминия в отраженной ударной волне // *Физика горения и взрыва*. — 2011. — Т. 47, № 3. — С. 47–51.

*Поступила в редакцию 21/І 2015 г.,
в окончательном варианте — 3/VI 2015 г.*