

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ И СОДЕРЖАНИЯ МЕТАЛЛА НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ КОНДЕНСИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

А.Г. Коротких^{1,2}, В.А. Архипов², И.В. Сорокин¹

¹Энергетический институт, Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики,
Томский государственный университет, 634050, г. Томск, Российская Федерация

В настоящее время существуют аналитические физико-математические модели горения гомогенной конденсированной системы, модели горения отдельных частиц металла (в основном алюминия) в газовом потоке [1, 2]. Детерминированные математические модели [3] горения гетерогенной конденсированной системы (ГКС) и металла включают десятки теплофизических, диффузионных и кинетических констант, по которым отсутствуют достоверные данные, и не позволяют получить количественные оценки влияния дисперсности порошков металла на горение ГКС.

В рамках предлагаемой модели рассматривается горение ГКС с ведущей стадией в газовой фазе и диффузионным механизмом горения частиц металла в зоне газозафазных реакций.

При разработке физико-математической модели горения ГКС, содержащей порошок металла, приняты следующие основные допущения:

1. Ведущая стадия горения ГКС находится в газовой фазе;
2. Горение частиц металла происходит в диффузионном режиме;
3. Зона горения квазигомогенная и одномерная;
4. Линейная скорость горения ГКС определяется градиентом температуры в зоне горения;
5. Частицы металла представляют собой сплошные сферы и монодисперсны;
6. Частицы металла движутся равновесно с газовой фазой без динамического отставания.

Скорость горения безметалльной ГКС за счет гомогенной реакции (теория Зельдовича [4])

$$u_0 = \frac{1}{\rho_{pr} q_0} \sqrt{2\lambda \int_{T_s}^{T_{ad}} Q_1(T) dT}, \quad (1)$$

где $Q_1(T)$ – объемная скорость выделения тепла за счет реакции горения безметалльной ГКС [5]; T_s – температура поверхности горения ГКС; T_{ad} – максимальная температура горения в газовой фазе безметалльной ГКС; ρ_{pr} – плотность ГКС; λ – коэффициент теплопроводности газа; q_0 – теплота газозафазной реакции горения на единицу массы ГКС.

В предположении того, что химические реакции горения ГКС и частиц металла протекают в газозафазной зоне, можно записать выражение [6]

$$u = \frac{1}{\rho_{pr} (m_{Me} q_p + (1 - m_{Me}) q_0)} \sqrt{2\lambda \int_{T_s}^{T_{ad1}} Q_1(T) dT + 2\lambda \int_{T_s}^{T_{ad1}} Q_2(T) dT}, \quad (2)$$

где m_{Me} – массовая доля частиц металла на поверхности горения; q_p – тепловой эффект реакции окисления на единицу массы металла; T_{ad1} – максимальная температура в зоне горения металлзированной ГКС, которая определяется формулой

$$T_{ad1} = T_s + \left(\frac{c_p}{c} - 1 \right) m_{Me} T_s + \frac{q_0 (1 - m_{Me}) + (q_p - q_{ev}) m_{Me}}{c}, \quad (3)$$

где c , c_p – удельная теплоемкость газа и металла; q_{ev} – удельная теплота испарения металла.

Объемная скорость тепловыделения за счет гетерогенной реакции диффузионного горения на поверхности частиц металла

$$Q_2(T) = \frac{6q_p m_{Me} \rho_{pr}}{\rho_p D^2 (1 - m_{Me})} \cdot Nu \cdot Q_p(T, T_b) \cdot \max[0, \text{sgn}(T_s - T_b)], \quad (4)$$

где $Q_p(T, T_b)$ – тепловыделение при горении частиц металла; $Nu = \alpha D / \lambda$ – число Нуссельта; α – коэффициент теплоотдачи от газового потока окислителя к поверхности частицы металла; T_b – температура кипения металла (температура поверхности частицы); D – среднемассовый диаметр частиц металла.

Значение коэффициента K_u равно отношению скорости горения ГКС, содержащей порошок металла, к скорости горения безметалльной системы, и оценивающего эффективность добавки металлического горючего на горение ГКС в зависимости от его размера частиц и содержания, можно представить в виде

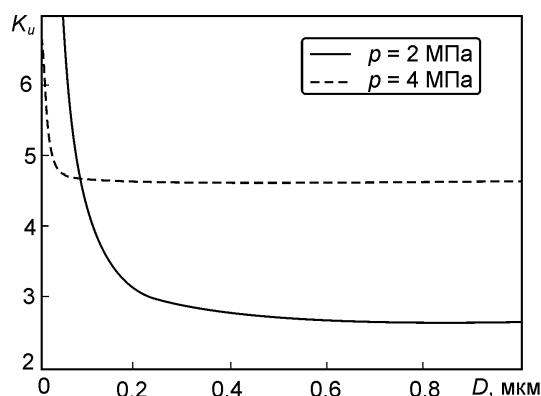
$$K_u = \frac{u}{u_0} = \frac{u_0'}{u_0} \frac{1}{1 + m_{Me} \left(\frac{q_p}{q_0} - 1 \right)} \sqrt{1 + \frac{J_2}{J_1}}, \quad (5)$$

где $J_1 = \int_{T_s}^{T_{ad1}} Q_1(T) dT$, $J_2 = \int_{T_s}^{T_{ad1}} Q_2(T) dT$ – интегралы функций тепловыделения за счет горения безметалльной ГКС и порошка металла.

Для расчета линейной скорости горения, коэффициента K_u и интеграла функции тепловыделения при горении безметалльной гомогенной конденсированной системы использовалась экспериментальная зависимость для пороха Н [6]

$$u_0 = 1.71 \left(\frac{p}{p_{atm}} \right)^{0.409}. \quad (6)$$

Результаты расчета K_u для модельной ГКС, содержащей порошок алюминия, представлены на рисунке. Уменьшение диаметра частиц при фиксированном значении массовой доли порошка алюминия $m_{Me} = 0.05$ в составе ГКС приводит к увеличению скорости горения. При диаметре частиц алюминия $D = 0.01$ мкм значение K_u выходит на постоянное значение при давлении окружающей среды 4 МПа, и при $D = 0.6$ мкм – $p = 2$ МПа. Кроме того при увеличении диаметра частиц алюминия величина интеграла функции тепловыделения за счет гетерогенного горения частиц J_2 убывает, в результате K_u перестает зависеть от давления.



Значение коэффициента K_u для модельной ГКС в зависимости от размера частиц алюминия.

Для сравнительного анализа расчетных результатов с экспериментальными данными скорости горения модельной ГКС [7] представим значение коэффициента K равного отношению скорости горения системы, содержащей НП алюминия Alex ($D = 0.18$ мкм), к скорости горения системы, содержащей микроразмерный порошок алюминия АСД-4 ($D = 7.34$ мкм). Значения K для модельной ГКС, содержащей порошок алюминия, представлены в таблице.

Значения коэффициента K в зависимости от содержания Al в ГКС при разных давлениях

Массовая доля порошка алюминия в составе ГКС m_{Me}	Значение $K = u_{Alex} / u_{АСД-4}$ при давлении			
	$p = 2$ МПа		$p = 4$ МПа	
	расчет	эксперимент [7]	расчет	эксперимент [7]
0.1	1.26	1.61	1.44	1.80
0.2	5.79	2.30	5.03	2.57

Анализ результатов показал, что при увеличении массовой доли металлического горючего в составе ГКС разность расчетных и экспериментальных значений K увеличивается. Последний факт является следствием предположения, что горение летучих компонентов ГКС в газовой фазе и горение частиц металла происходит в пределах одного фронта пламени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусаченко Л.К., Зарко В.Е., Зырянов В.Я., Бобрышев В.П. Моделирование процессов горения твердых топлив. Новосибирск: Наука, 1985. 179 с.
2. Beckstead M.W., Puduppakkama K., Thakreb P., Yang V. **Modeling of combustion and ignition of solid-propellant ingredients** // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2007. Vol. 33. P. 497–551.
3. Липанов А.М., Булгаков В.К., Кодолов В.Н. Моделирование горения полимерных материалов. М.: Химия, 1990. 240 с.
4. Зельдович Я.Б. К теории горения порохов и взрывчатых веществ // Теория горения порохов и взрывчатых веществ. М.: Наука, 1982. С. 49–86.
5. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
6. Архипов В.А., Коротких А.Г., Гольдин В.Д. Оценка влияния дисперсности и содержания порошка алюминия на скорость горения гетерогенных конденсированных систем // *Химическая физика и мезоскопия*. 2012. Т. 14, № 2. С. 161–174.
7. Архипов В.А., Коротких А.Г., Кузнецов В.Т., Савельева Л.А. Влияние дисперсности добавок металлов на скорость горения смесевых композиций // *Химическая физика*. 2004. Т. 23, № 9. С. 18–21.