

**ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ  
ИМ. С.А. ХРИСТИАНОВИЧА СО РАН  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

## **Т Р У Д Ы**

**XIV Всероссийского семинара «Динамика Многофазных Сред»,  
приуроченного к 75-летию академика РАН Фомина В.М.  
2 – 5 ноября 2015 г.**

Под редакцией В.М. Фомина, А.В. Федорова

**Новосибирск  
2015**

## ОРГАНИЗАЦИОННО-ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ:

1. академик РАН В.М. Фомин – председатель,
2. д.ф.- м.н. А.В. Федоров – сопредседатель.
3. к.ф. - м.н. А.А. Жилин – уч. секретарь,
4. академик Р.И. Нигматулин,
5. академик В.А. Левин,
6. д.ф. - м.н. В.А. Архипов,
7. д.ф. - м.н. А.А. Васильев,
8. д.ф. - м.н. А.А. Губайдуллин,
9. д.ф. - м.н. В.В. Кузнецов,
10. д.ф. - м.н. В.Ф. Куропатенко,
11. д.ф. - м.н. В.И. Пеньковский;
12. д.ф. - м.н. В.И. Терехов,
13. д.ф. - м.н. С.Ф. Урманчеев.

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. *Рычков А.Д.*  
д-р физ.-мат. наук, проф. *Ковалев О.Б.*

Работа семинара проходит в главном корпусе ИТПМ СО РАН  
по адресу г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1:

4 этаж, Большой Конференц-Зал

2 этаж (216 к.), Зал Ученого Совета



Семинар проводится при финансовой поддержке  
Российского Фонда Фундаментальных Исследований,  
грант № 15-01-20576

Динамика Многофазных Сред: Труды XIV Всероссийского семинара, приуроченного  
к 75-летию академика РАН Фомина В.М. / Под редакцией В.М. Фомина,  
А.В. Федорова Новосибирск: Автограф, 300 с.

Ответственный за выпуск А.А. Жилин  
Технический редактор А.А. Жилин

Формат бумаги 70x100 1/16, Усл. п. л. 25.4 Уч.-изд. л.  
21.2, Тираж 120 экз., Заказ № 1027

Отпечатано в ООО "Автограф"  
630090, Новосибирск-90, Институтская, 4/1

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

А.Г. Коротких<sup>1,2</sup>, В.А. Архипов<sup>2</sup>, И.В. Сорокин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Энергетический институт, Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Научно-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;  $\rho_{pr}$  – плотность ГКС;  $\lambda$  – 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 металлизированной 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;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от газового потока окислителя к поверхности частицы металла;  $T_b$  – температура кипения металла (температура поверхности частицы);  $D$  – среднemasсовый диаметр частиц металла.

Значение коэффициента  $K_u$  равного 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

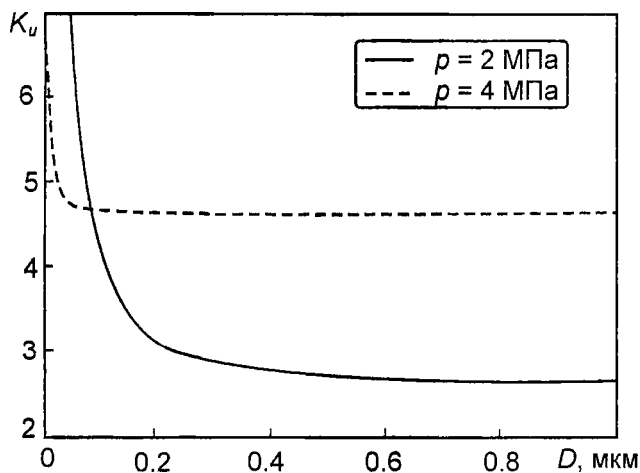
$$K_u = \frac{u}{u_0} = \frac{u_0'}{u_0} \frac{1}{1 + m_{Me} \left( \frac{q_p}{q_0} - 1 \right)} \sqrt{1 + \frac{J_2}{J_1}}, \quad (5)$$

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.