

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ БИДИСПЕРСНОЙ АЭРОВЗВЕСИ ПОРОШКА БОРА

А.А. Хакимов, К.М. Моисеева, А.Ю. Крайнов

*Томский государственный университет
634050, Томск, Россия*

В течение последних десятилетий происходит расширение области практического применения порошкообразных металлов (ПМГ), которые позволяют повысить энергетические и улучшить эксплуатационные характеристики двигательных установок. Использование ПМГ, в качестве которого рассматриваются такие металлы как Al и В, может повысить энергетические и улучшить эксплуатационные характеристики двигательных установок. Обусловлено это такими преимуществами металлосодержащих топлив как высокая температура пламени, легкость хранения и применения порошкообразных металлов в качестве одного из компонентов псевдожидкого топлива для двигателей летательных аппаратов. Введение порошкообразных металлов в состав твердого топлива позволяет увеличить температуры горения и удельный импульс. В статье [1] представлена диаграмма иллюстрирующая увеличение объемных импульсов тяги для разных типов двигателей и разных топлив, из которого видно увеличение удельного импульса при использовании порошкообразных металлов Al и В (ввиду большой теплоты сгорания и высокой плотности).

Теплофизические свойства бора позволяют обеспечить высокие температуры сгорания и высокий тепловой эффект сгорания частиц бор. В связи с этим возникает интерес к исследованию горения частиц бор как одиночных, так и в качестве аэровзвеси. Для эффективного использования частиц бора необходимо определение времени сгорания частиц, скорости его горения, а также состав продуктов сгорания.

Целью настоящей работы является параметрическое исследование скорости горения бидисперсной аэровзвеси порошка бора.

Постановка задачи и метод решения основывались на работах [2, 3]. Окисление и горение бора включает три реакции: реакция образования и испарения оксида бора, две поверхностные реакции между кислородом и бором с образованием двух газообразных реагирующих оксидов бора. Нагрев частиц приводит к их окислению с образованием окисной пленки. Дальнейший разогрев приводит к испарению окисной пленки. Скорость испарения определяется давлением насыщенных паров вокруг частиц бора. Окисление бора через окисную пленку определяется через эффективный коэффициент массоотдачи, учитывающий слой оксида на частице. Разогрев частиц до температуры выше температуры кипения оксида бора приводит к быстрому испарению окисной пленки и началу гетерогенных химических реакций на поверхности частиц. Гетерогенные химические реакции на поверхности частиц описываются с использованием кинетических констант [2] и с учетом массоотдачи [3].

Математическая модель основана на двухфазной двухскоростной модели реагирующей газодисперсной среды и определяется системой уравнений сохранения массы, импульса, полной энергии газа (с учетом теплопроводности) и частиц с учетом химической реакции на поверхности, уравнений сохранения массы компонентов газовой смеси с учетом их диффузии и выгорания и уравнения выгорания частиц.

Задача решалась численно с использованием алгоритмов С.К. Годунова [4] и А.Н. Крайко [5]. Слагаемые в правых частях уравнений, описывающие процессы переноса за счет теплопроводности и диффузии, аппроксимировались явно на трехточечном шаблоне. Шаг по пространству в области источника зажигания (до координаты $r = 0.2$ м) задавался

постоянным и равным 10^{-5} м. Далее, шаг по пространству увеличивался в направлении правой границы по правилу $r_{i+1} = 1.005 \cdot r_i$. Размер расчетной области выбирался таким, чтобы за время воспламенения и формирования волны горения ударная волна, возникающая при энергосвободении от искрового пробы, не успела дойти до границы расчетной области. Шаг по времени определялся из условий устойчивости Куранта,

$$\Delta t < \min \left(\frac{\Delta h_i}{\max [c] + \max [u_g]}, \frac{c_g \rho_g h_i^2}{\lambda_g} \right), \text{ где } c - \text{ скорость звука, } \rho_g - \text{ плотность газа, } u_g -$$

скорость движения газа, c_g – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, λ_g – теплопроводность газа.

В расчетах варьировались размер частиц (r_p), масса взвеси (m_p) и процентное соотношение между фракциями частиц во взвеси. Были выбраны следующие значения параметров расчета:

- Радиус частиц $r_p = 2 \cdot 10^{-6}$ м, 10^{-6} м, $0.5 \cdot 10^{-6}$ м.
- Масса взвеси $m_p = 0.2 \div 0.4$ кг/м³.

Результаты расчета представлены на рисунках 1 – 2.

На рисунке 1 представлена зависимость нормальной (u_n) и видимой (u_f) скорости распространения фронта горения в аэровзвеси частиц от массы взвеси при фиксированном процентном содержании частиц во взвеси.

На рисунке 2 представлена зависимость нормальной (u_n) и видимой (u_f) скорости распространения фронта горения в аэровзвеси частиц от массы взвеси при фиксированных размерах частиц.

Согласно полученным результатам, представленным на рисунках 1 и 2, увеличение массы аэровзвеси приводит к уменьшению видимой u_f и нормальной u_n скорости горения аэровзвеси. При большом количестве частиц мелкодисперсной фракции (сплошная кривая на рисунке 2b) имеет место нелинейная зависимость нормальной скорости горения аэровзвеси бидисперсного порошка бора от массовой концентрации частиц. Зависимость видимой скорости горения при этом носит линейный характер.

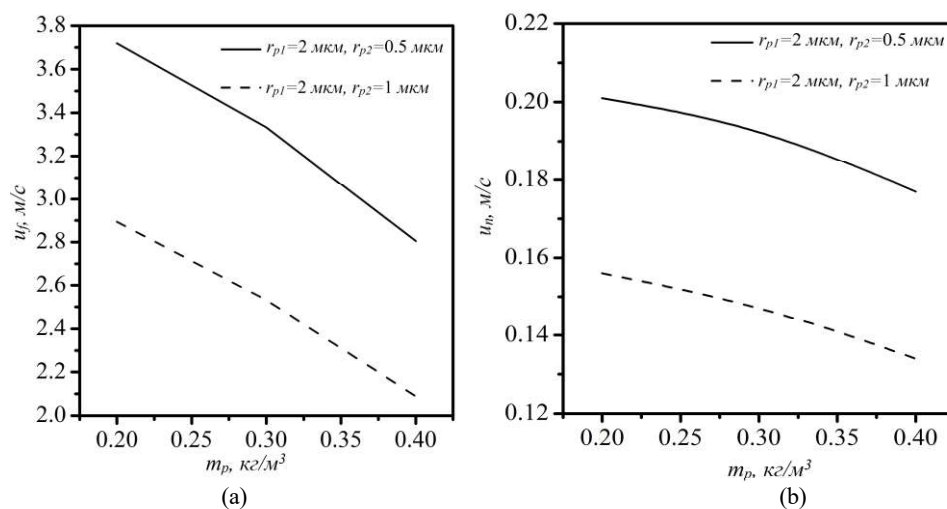


Рис. 1. Зависимость видимой (а) и нормальной (б) скорости распространения фронта горения в аэровзвеси частиц от массы взвеси при фиксированном процентном содержании частиц во взвеси $m_{p1} = m_{p2} = 0.5m_p$

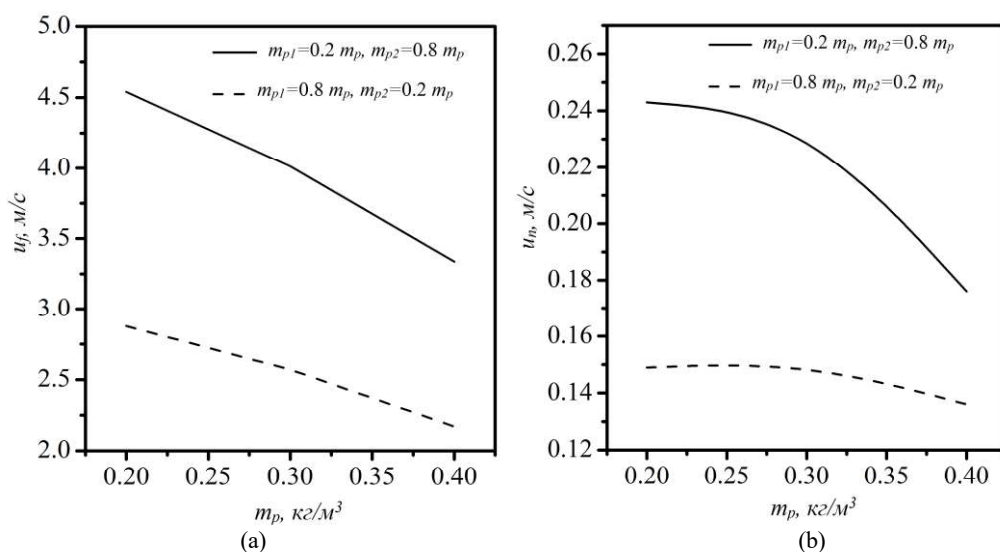


Рис. 2. Зависимость видимой (а) и нормальной (б) скорости распространения фронта горения в аэровзвеси частиц от массы взвеси при фиксированных размерах частиц $r_{p1} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, $r_{p2} = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$

Полученные результаты согласуются с результатами расчета скорости горения монодисперсной аэровзвеси порошка бора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров А.Г., Тизлов А.С. Перспективы и проблемы создания двигательных и энергетических установок на порошкообразном металлическом горючем// Вестник СГАУ. 2011. №3-2. С. 277 – 281.
2. Ягодников Д. А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов, Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009
3. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю. Численное моделирование искрового зажигания аэровзвеси угольной пыли// Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54. № 2. С. 61–70.
4. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики, Москва: Наука, 1976.
5. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной 'собственного' давления// Прикладная математика и механика. 1979. Т. 43. № 3. С. 500–510.