

ПРЕДЕЛЫ ЭСТАФЕТНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТВЕРДОГО ПЛАМЕНИ ПРИ ЛУЧИСТОЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ

А.П. Алдушин*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук, Черноголовка, Россия

*analdushin@mail.ru

Традиционное описание распространения твердого пламени основывается на предположении о тепловой гомогенности спрессованных конденсированных смесей, используемых в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Обоснованием такого приближения является сильное неравенство между контролируемой диффузией скоростью тепловыделения и скоростью тепловой релаксации в плотно спрессованных смесях. Экспериментальные исследования показали, что в некоторых случаях, тепловая однородность реагирующей среды может нарушаться, что проявляется в наблюдаемом на прецессионной видеосъемке отрыве температуры реагирующего микрообъема от температуры окружающих частиц. Данные наблюдения послужили отправной точкой для создания концепции эстафетного механизма горения СВС систем. В отличие от теплопроводностного механизма передачи тепла с непрерывным распределением температуры по частицам среды, эстафетный механизм предполагает дискретное поле температуры в реагирующей системе. Теоретические исследования модели эстафетного горения выполнены в работах А.Г. Мержанова с сотрудниками [1]. Убедительным экспериментальным доказательством реальности эстафетного механизма распространения твердого пламени являются работы С.Г. Вадченко [2, 3], показавшего возможность самораспространения процесса горения в слоевой системе из реакционно способных дисков, разделенных газовым зазором (рис. 1). В качестве горючих элементов использовались тонкие диски из спрессованной смеси порошков ($5\text{Ti} + 3\text{Si}$). После инициирования реакции в одном из дисков пламя распространялось по всей слоевой системе при условии, что расстояние между дисками не превышало некоторого критического значения. Эксперименты проводились в различных газовых атмосферах, включая условия близкие к вакууму. Последнее указывает, что основной вклад в передаче теплового импульса от диска к диску принадлежит излучению.

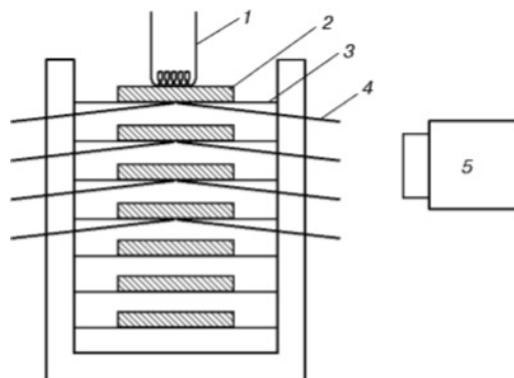


Рисунок 1. Схема эксперимента, иллюстрирующего эстафетный режим горения: 1 – поджигающая спираль; 2 – диски из спрессованной смеси порошков ($5\text{Ti} + 3\text{Si}$); 3 – проволоочные держатели; 4 – термопары; 5 – видеокамера [3].

В настоящей работе исследуется вопрос о пределе горения рассматриваемой слоевой системы при эстафетном механизме передачи поджигающего импульса посредством радиации. Как показано Я.Б. Зельдовичем [4], возникновение предела горения обусловлено положительной обратной связью между интенсивностью потерь тепла и скоростью тепловыделения. При горении сплошных образцов потери тепла осуществляются через боковую поверхность. В рассматриваемом случае слоевой системы из тонких дисков толщиной $\delta \sim 100\ \mu\text{m}$, площадь боковой поверхности мала и потерями тепла по этому маршруту можно пренебречь. Основным источником потери энергии в слоевой системе является излучение через боковую поверхность зазора, которое безвозвратно уходит из системы (рис. 2).

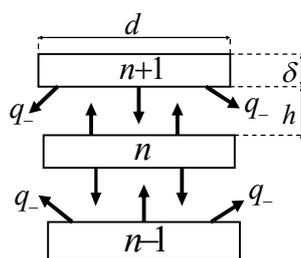


Рисунок 2. Потоки излучения через боковые границы зазора (q_-) являются основным источником потерь энергии при эстафетном режиме горения слоевой системы.

Отношение лучистой энергии, поглощаемого диском n к полной энергии, излучаемой соседним диском определяется коэффициентом облученности φ . Для соосных дисков с одинаковым диаметром d и зазором h величина φ определяется выражением [5]:

$$(1) \quad \varphi = [\sqrt{1 + (h/d)^2} - h/d]^2.$$

С учетом этого фактора тепловой баланс диска n в слоевой системе следует записать в виде:

$$(2) \quad c\rho V \frac{dT_n}{dt} = QV \frac{d\eta_n}{dt} + \sigma_{ef} S(\varphi T_{n-1}^4 - T_n^4) + \sigma_{ef} S(\varphi T_{n+1}^4 - T_n^4)$$

Кинетика выгорания диска записывается в стандартном виде

$$(3) \quad \frac{d\eta_n}{dt} = K(T_n) f(\eta_n), \quad K(T_n) = k_0 \exp(-E/RT).$$

Здесь t – время, T_n, η_n – температура и глубина выгорания диска n ; V, S, δ – объем, сечение и толщина диска; Q – тепловой эффект на единицу объема, c, ρ – теплоемкость и плотность, σ_{ef} – эффективный коэффициент излучения поверхности диска, K, k_0, E – константа скорости, предэкспонент и энергия активации реакции.

Для численного решения задачи уравнения (2) – (3) приводились к безразмерной форме:

$$(4) \quad \frac{d\theta_n}{d\tau} = \alpha[\varphi(\theta_{n-1}^4 + \theta_{n+1}^4 - 2\theta_n^4) + q \frac{d\eta_n}{d\tau}]$$

$$(5) \quad \frac{d\eta_n}{d\tau} = \exp[Ar(1 - 1/\theta_n)]$$

Безразмерные переменные и параметры в уравнениях (2)–(3) определены следующим образом:

$$\tau = tK(T_a), \quad \theta = T/T_a, \quad \alpha = \frac{\sigma_{ef} T^3}{c\rho\delta K(T_a)}, \quad Ar = \frac{E}{RT_a}, \quad q = Q/c\rho$$

Величина $T_a = T_0 + q$ соответствует адиабатической температуре сгорания системы при начальной температуре T_0 . Уравнения (4)–(5) рассматривались для слоевой системы из $N \gg 1$ дисков. В качестве начального условия задавалось:

$$(6) \quad \theta_n = \theta_0 = T_0/T_a, \quad \eta_n = 0, \quad (1 < n < N).$$

Систему параметров, определяющих решение задачи можно разделить на две группы. Одна из них (α, Ar, q, θ_0) характеризует физико-химические свойства системы, другая (φ)

– её конфигурацию. В соответствии с экспериментом в ходе расчетов фиксировались физико-химические характеристики и исследовалось поведение системы в зависимости от параметра φ , зависящего от диаметра дисков (d) и расстояния (h) между ними. На рисунке 3 показано изменение скорости выгорания ω слоевой системы при изменении значения φ . Величина ω , определяемая как $\omega = d(\sum_1^N \eta_n) / d\tau$, имеет смысл массовой скорости горения. В отличие от линейной скорости U величина ω может быть определена для любого момента времени τ , что делает её удобной характеристикой горения для дискретных систем. Для всех рассмотренных вариантов набора параметров α, Ar, q, θ_0 зависимость $\omega(\varphi)$ имеет вид (рис. 3).

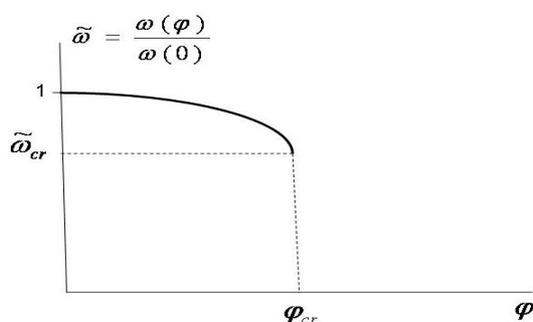


Рисунок 3. Зависимость скорости выгорания слоевой системы от величины φ .

Подставляя значение φ_{cr} в выражение (1) можно определить значение h/d на пределе горения. Последнее означает, что величина зазора между дисками, допускающая эстафетное распространение твердого пламени в слоевой системе пропорциональна диаметру диска. Коэффициент пропорциональности определяется физико-химическими параметрами реагирующего вещества. Представляет интерес проверка данного заключения анализа на эксперименте.

Литература

- [1] А.С. Рогачев, А.С. Мукасян, Горение для синтеза материалов. Москва, Физматгиз, 2012, с. 400.
- [2] S.G. Vadchenko, A.G. Merzhanov, Dokl. Ross. Akad. Nauk, 352, (1997), pp. 487–489.
- [3] S.G. Vadchenko, Combustion, Explosion, and Shock Waves, 37, (2001), pp. 159–167.

[4] Я.Б. Зельдович, ЖЭТФ, 11, (1041), с. 159.

[5] С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. Справочник по теплопередаче. Москва, Ленинград, Госэнергоиздат, 1958, с. 414.