

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

**РАЗВИТИЕ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА В ПОГЛОЩАЮЩЕЙ,
РАССЕИВАЮЩЕЙ И ТЕПЛОПРОВОДНОЙ СРЕДЕ**

В. И. Половников, Ю. А. Попов

(Свердловск)

В задачах теплового взрыва неизотермического объема обычно полагают, что перенос тепла осуществляется только теплопроводностью [1]. Самовоспламенение при лучисто-кондуктивном теплообмене изучено в значительно меньшей степени, причем учет рассеяния не проводился.

Рассмотрим плоский слой серой, рассеивающей и теплопроводной среды, заключенной между двумя бесконечными непроницаемыми черными стенками. В объеме протекает экзотермическая химическая реакция, константа скорости которой описывается уравнением Аррениуса. Считаем, что теплофизические свойства среды не зависят от температуры. В этом случае уравнение энергии имеет вид

$$\rho c_p \cdot dT/dt = \lambda \cdot d^2T/dx^2 - d\bar{q}_n/dx + Q, \quad (1)$$

где ρ , c_p , λ — плотность, удельная теплоемкость при постоянном давлении, теплопроводность среды; T — абсолютная температура среды; t — время; x — координата; $\bar{q}_n$ — вектор плотности потока излучения; Q — мощность химического тепловыделения в единице объема.

Используя выражение для дивергенции вектора плотности потока излучения в квазиодномерном приближении [2], запишем уравнение (1) в безразмерном виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} = N \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \tau^2} + (1 - \gamma) \left\{ \frac{\Theta_1^4 E_2^*(0, \tau) + \Theta_2^4 E_2^*(0, \tau_0 - \tau)}{2} + \right. \\ \left. + \frac{(1 - \gamma)}{2} \left[\int_0^\tau \Theta^4(\tau') E_1^*(\tau', \tau) d\tau' + \int_\tau^{\tau_0} \Theta^4(\tau') E_1^*(\tau_0 - \tau', \tau_0 - \tau) d\tau' \right] - \Theta^4 \right\} + Q'. \end{aligned} \quad (2)$$

В (2) введены следующие безразмерные параметры: $\Theta = T/T_0$, $\Theta_1 = T_1/T_0$, $\Theta_2 = T_2/T_0$ — температуры; $\xi = \frac{4k\sigma T_0^3}{\rho c_p} t$ — время; $N = \lambda k / 4\sigma T_0^3$ — кондуктивно-радиационный параметр, $Q' = \frac{vq}{4k\sigma T_0^4}$ — мощность химического тепловыделения. Здесь T_0 — определяющая

абсолютная температура; T_1 , T_2 — абсолютные температуры первой и второй стенок; k — линейный коэффициент ослабления; σ — постоянная Стефана — Больцмана; $\tau = kx$, $\tau_0 = kl$ — оптическая глубина и оптическая толщина слоя; l — толщина слоя; v — скорость химической реакции; q — тепловой эффект реакции. В выражении (2) γ — альбедо однократного рассеяния, а E_1^* , E_2^* — модифицированные интегральные показательные функции:

$$\begin{aligned} E_n^*(x, y) = \int_0^{+1} \mu^{n-2} I_0(x) \frac{e^{-\frac{x(y-x)}{\mu}}}{1 - R_\infty^2 e^{-\frac{2x(\tau_0-x)}{\mu}}} \left[1 - R_\infty^2 e^{-\frac{2x(\tau_0-y)}{\mu}} + \right. \\ \left. + R_\infty - R_\infty e^{-\frac{2x(\tau_0-y)}{\mu}} \right] d\mu. \end{aligned}$$

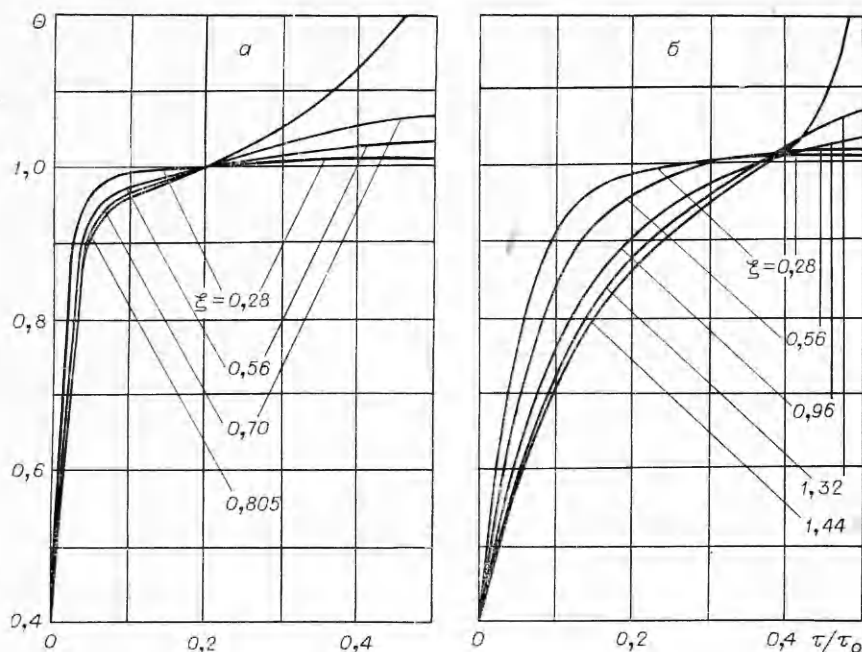


Рис. 1. Профили безразмерной температуры при развитии теплового взрыва.
а) $N=0,00132$, $l=1,35$ м; б) $N=0,066$, $l=0,027$ м.

Здесь $\kappa = \sqrt{(1-\gamma)(1-\bar{\mu})}$, где $\bar{\mu}$ — средний косинус угла рассеяния;

$$R_{\infty} = \frac{\sqrt{1-\bar{\mu}\gamma} - \sqrt{1-\gamma}}{\sqrt{1-\bar{\mu}\gamma} + \sqrt{1-\gamma}}; I_0(x) = \frac{1+R_1}{1-R_1R_2}; R_1 = R_{\infty} \frac{1 - e^{\frac{-2\kappa x}{\mu}}}{1 - R_{\infty}^2 e^{\frac{-2\kappa x}{\mu}}};$$

$$R_2 = R_{\infty} \frac{1 - e^{\frac{-2\kappa(\tau_0 - x)}{\mu}}}{1 - R_{\infty}^2 e^{\frac{-2\kappa(\tau_0 - x)}{\mu}}}.$$

Уравнение энергии (2) справедливо для газовзвеси, если считать ее квазиоднородной средой с эффективными теплофизическими характеристиками. Проведен расчет развития теплового взрыва в слое мелких частиц углерода, взвешанных в воздухе. Считаем, что в течение периода индукции локальные температуры газа и частиц совпадают, выгорание частиц отсутствует и окислителя достаточно для полного протекания реакции. Справедливость такого предположения для частиц малых размеров показана в [3], где дается упрощенный учет теплообмена в двухтемпературном приближении.

Интегродифференциальное уравнение энергии (2) решено численно на ЭЦВМ. Использована явная разностная схема с коррекцией на каждом шаге по времени. Заданы следующие краевые условия: $\Theta_{\tau=0} = \Theta_1$, $\Theta_{\tau=\tau_0} = \Theta_2$, $\Theta_{\xi=0} = \Theta_0$. В расчетах принято: $T_0 = 770$ К, $\Theta_1 = \Theta_2 = 0,39$, $\Theta_0 = 1$, $\tau_0 = 3,24$. Оптические постоянные углерода взяты из [4] для длины волны излучения, соответствующей максимуму функции Планка при 770 К. Дисперсия и температурная зависимость оптических постоянных не учитывались. По теории Г. Ми проведен расчет оптических характеристик газовзвеси для частиц, имеющих параметр размера ρ_0 в пределах от 5 до 10 ($\rho_0 = \pi d/\lambda'$, где d — диаметр частицы, а λ' — длина волны излучения). Расчет показал, что в указанном диапазоне ρ_0 можно приближенно принять $\gamma = 0,63$, $\bar{\mu} = 0,8$.

Предэкспоненциальный множитель и энергия активации в выражении для константы скорости реакции окисления углерода взяты из [5]. С учетом этого выражение для безразмерной мощности химического тепловыделения примет вид

$$Q' = 0,226 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-25,97/\Theta).$$

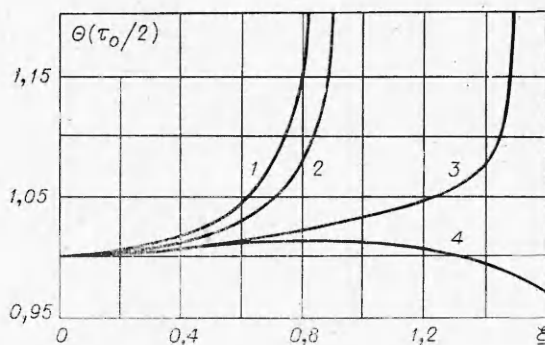


Рис. 2. Изменение безразмерной температуры в центре слоя при развитии теплового взрыва.
1, 2 — $N=0,00132$; 3 — 0,066; 4 — 0,09.

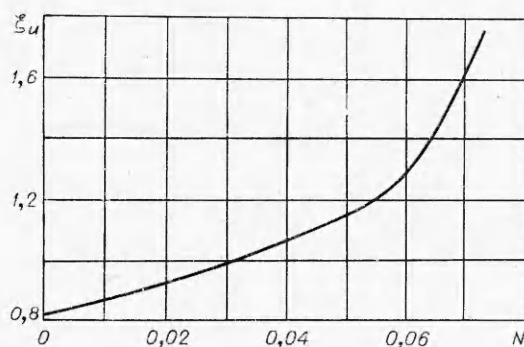


Рис. 3. Влияние кондуктивно-радиационного параметра на период индукции.

На рис. 1 показано изменение температурных полей по толщине слоя в процессе развития теплового взрыва; коэффициент теплопроводности взят для воздуха при температуре 770 К. Возможны случаи, когда температура в центре слоя, несмотря на первоначальное возрастание, убывает и тепловой взрыв не возникает (рис. 2). Так, в настоящем варианте расчета слой остывает при $N \geq 0,075$ ($l \leq 0,024$ м) (рис. 3). Из расчетов найдено, что при $N \leq 0,002$ перенос тепла теплопроводностью не влияет на величину периода индукции.

Таким образом, расчеты показали, что среда быстро становится существенно неизо-термичной из-за потерь тепла в стенки. Тепловой взрыв возникает в центре слоя, но возможны случаи первоначального саморазогрева, а затем остывания центра слоя.

Поступила в редакцию
9/XI 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., «Наука», 1967.
2. Ю. А. Попов, В. И. Щербинин. ПМТФ, 1977, 3.
3. Д. М. Хзмалян, Т. В. Вилеиский. Теплоэнергетика, 1967, 8.
4. У. Х. Далзел, Э. Ф. Сэрофим. Теплопередача. Сер. С, 1969, 1.
5. С. Э. Хайкина. ЖТФ, 1938, 8, 1.