

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заславский Б. И. О нелинейном взаимодействии сферической ударной волны, возникшей в результате взрыва заглубленного заряда со свободной поверхностью воды // ПМТФ. 1964. Вып. 4. С. 57 – 65.
2. Севостьянов Г. Д. Структура элементарных околосвуковых решений // Аэродинамика. Нелинейные проблемы: Межвуз. сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1997. Вып. 14(17). С. 109 – 117.
3. Фалькович С. В., Чернов И. А. Обтекание тела вращения звуковым потоком газа // ПММ. 1964. Т. 28. С. 280 – 284.

УДК 517.958:536.2

В. Ю. Ольшанский, В. Ю. Михайлов, А. В. Серебряков

РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА КОМПОНЕНТ В ОДНОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ РАСЩЕПЛЕНИИ ГРАФИТА

Рассмотрим термическое расщепление предварительно окисленного графита (ОГ) в случае, когда два размера технологической формы много больше третьего. Расчеты проводятся на основе одномерной модели для бесконечного слоя, помещенного между двумя пластинами, через которые осуществляется нагрев. В первоначальной засыпке технологической формы $h_0/L < 1$, где h_0 – толщина слоя графита и L – расстояние между пластинами, принятое за характерную длину при переходе к безразмерным величинам.

В рамках предложенной модели процесс термического расщепления разделяется на три стадии. Первая стадия описывает нагрев слоя ОГ за счет конвективного теплообмена через нижнее основание. Между слоем графита и верхней пластиной имеется воздушная прослойка. Интенсивность теплообмена с этой прослойкой считается пренебрежимо малой. Распределение температуры в слое ОГ определяется из решения задачи нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = Fo^{(1)} \cdot \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}, \quad 0 < x < h_0/L, \quad 0 < t < t_1, \quad (1)$$

$$u_1(x, 0) = u_0, \quad 0 < x < h_0/L, \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial u_1}{\partial x} \right|_{x=0} - Bi^{(1)} \cdot u_1(0, t) + Bi^{(1)} \cdot u_* = 0, \quad \left. \frac{\partial u_1}{\partial x} \right|_{x=h_0/L} = 0. \quad (3)$$

Здесь Fo, Bi – соответственно числа Фурье и Био. Первая стадия завершается в момент $t = t_1$, для которого $u(0, t_1) = u_*$. Здесь u_* – температура, при которой возникает фаза терморасщепленного графита (ТРГ).

На второй стадии происходит нагрев через нижнее основание пакета слоёв ТРГ-ОГ. Для этой стадии характерно наличие двух подвижных границ: поверхности раздела фаз $x = \xi_n(t)$ и свободной поверхности ОГ $x = \varphi(t)$. Движение свободной поверхности связано с изменением объема графита при термическом расщеплении. Используется зависимость

$\varphi(t) = \frac{h_0}{L} + (1 - \frac{1}{\kappa}) \cdot \xi_n(t)$, где $\kappa = \text{const}$, $\kappa > 1$ – относительное изменение объема ОГ при его переходе в ТРГ. Распределения температуры $u_1(x, t)$ в слое ОГ и $u_2(x, t)$ в слое ТРГ определяются из решения задач нестационарной теплопроводности. В задаче для ТРГ используется начальное условие

$$u_2(x, t_1) = u_* + Bi^{(2)}(u_\infty - u_*) (\xi_n(t) - x), \quad 0 < x < \xi_n(t). \quad (4)$$

В формуле (4) $\xi_n(t)$ определяется из предположения, что в начале второй стадии поверхность $x = \xi_n(t)$ движется в течение малого промежутка времени δt_2 с постоянной скоростью. Скорость определяется выражением

$\frac{d\xi_n}{dt} = Bi^{(2)} \cdot (u_\infty - u_*) \cdot \frac{\kappa}{\Lambda}$, где Λ – безразмерный комплекс, связанный с энтальпией фазового перехода.

В дальнейшем скорость движения поверхности раздела фаз определяется из условия

$$\left(\frac{\partial u_1}{\partial x} - \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{\partial u_2}{\partial x} \right)_{x=\xi_n(t)} = \frac{\Lambda}{\kappa} \frac{d\xi_n}{dt}. \quad (5)$$

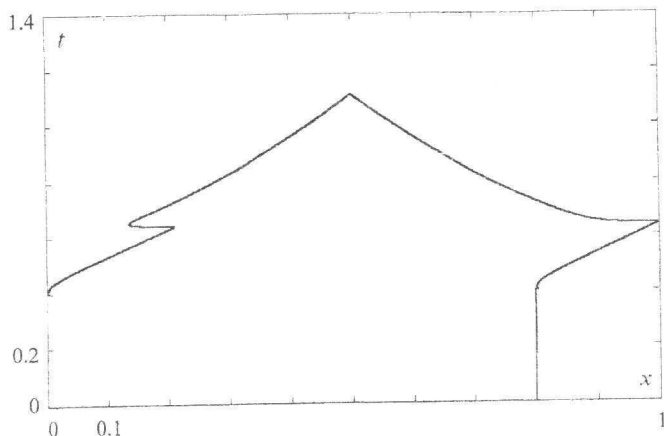
Здесь k_1, k_2 – коэффициенты теплопроводности ОГ и ТРГ соответственно.

Для решения задач теплопроводности с условием (5) использован метод выпрямления фронтов [1 – 4]. Решение ведется шагами по времени. Определив скорость $d\xi_n/dt$ и полагая, что ее значение не меняется на промежутке времени Δt , решаем задачи нестационарной теплопроводности для температур u_1 и u_2 . Используем при этом конечноразностную схему. Затем снова определяем $d\xi_n/dt$ и повторяем вычисления для следующего промежутка времени. Стадия нестесненного расширения пакета слоёв ТРГ-ОГ завершается в момент времени $t = t_2$, когда свободная поверхность ОГ касается верхней пластины, т.е. при выполнении условия $\varphi(t_2) = 1$.

На третьей, заключительной, стадии происходит нагрев пакета слоёв ТРГ-ОГ-ТРГ с поверхностями раздела $x = \xi_n(t)$ и $x = 1 - \xi_o(t)$. При этом объём между пластинами полностью занят ОГ и ТРГ, и переход из ОГ в ТРГ сопровождается изменением плотности ТРГ:

$$\rho_{2n} - \rho_{2o} = \rho_1 \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{1}{\kappa} \right) \cdot \frac{\xi_n(t_2)}{\xi_n(t) + \xi_o(t)} \right) \quad (6)$$

В формуле (6) $\rho_1, \rho_{2n}, \rho_{2g}$ – плотности в слоях пакета. Условия для тепловых потоков на поверхностях $x = \xi_n(t)$ и $x = 1 - \xi_g(t)$ брались с учетом малой скорости перемещения слоя ОГ. Третья стадия и вместе с ней весь процесс завершаются в момент времени $t = t_3$, для которого выполняется условие $\xi_n(t_3) + \xi_g(t_3) = 1$, т.е. весь объем ОГ переходит в ТРГ. На рисунке представлено распространение с течением времени свободной поверхности ОГ и поверхностей раздела ОГ-ТРГ.



Результат получен для значений $h_0/L = 0.8$, $t_0 = 300$ с, $\kappa = 20$, $F_0^{(1)} = 3.9$, $F_0^{(2)} = 51.4$, $Bi^{(1)} = 0.4$, $Bi^{(2)} = 4$, $k_1/k_2 = 0.1$, $\Lambda = 0.21$, $u_\infty/u_* = 2$, $u_0/u_* = 0.066$. Общее время процесса термического расщепления составило 330 с. Это согласуется с результатами экспериментов в лаборатории. Ранее в работах [3, 4] авторами представлены результаты для нестесненного терморасщепления графита.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Будаков Б. М., Васильев Ф. П., Успенский А. Б. Разностные методы решения некоторых краевых задач типа Стефана // Численные методы в газовой динамике: Сб. работ ВЦ МГУ. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1965. С. 139–183.
2. Вабищевич П. И., Самарский А. А. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
3. Михайлов В. Ю., Ольшанский В. Ю., Серебряков А. В. Метод выпрямления фронтов при численном моделировании термического расщепления графита // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред: Межвуз. сб. науч. тр. / ИИЦ Саратов. гос. техн. ун-та. Саратов, 2004. С. 72–76.
4. Михайлов В. Ю., Ольшанский В. Ю., Серебряков А. В. Решение задачи Стефана методом выпрямления фронтов для расчета процесса термического расщепления графита // Математика. Механика: Сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2004. Вып. 6. С. 202–205.