

**УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ  
ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ГОРЯЧЕЙ ЧАСТИЦЕЙ**

Д.О. Глушков, К.Ю. Вершинина

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [dmitriyog@tpu.ru](mailto:dmitriyog@tpu.ru)

**STABILITY OF POLYMERIC MATERIAL IGNITION BY HOT PARTICLE**

D.O. Glushkov, K.Yu. Vershinina

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin av., 30, 634050

E-mail: [dmitriyog@tpu.ru](mailto:dmitriyog@tpu.ru)

***Annotation.** As a result of the numerical investigation of a typical polymeric material ignition by a local energy source with limited heat content it has been determined three modes: gasification without ignition followed by pyrolysis stop, stable ignition, and unstable ignition. The mathematical model of the process takes in account conductive heat transfer and thermal decomposition in condensed phase, diffusion-convective heat and mass transfer and gaseous pyrolysis products oxidation of polymeric material in air.*

Условная схема исследуемого процесса изображена на рис. 1. Размеры области решения ( $x=l$ ,  $y=h$ ) значительно превосходят размеры локального источника ( $x_p=x_1$ ,  $y_p=y_2-y_1$ ). Предполагалось, что в начальный момент времени одиночная, нагретая до высоких температур ( $T_p$ ), стальная частица в форме параллелепипеда малых размеров инерционно осажается на поверхность типичного термопластичного полимера – полиметилметакрилата (ПММА). Температура полимерного материала ( $T_0$ ) существенно ниже начальной температуры источника энергии. За счет тепла, аккумулированного частицей, в течение некоторого времени ( $t_r$ ) происходит инертный прогрев приповерхностного слоя ПММА.

При достижении температуры пиролиза вблизи границы контакта полимерного материала (ПМ) с локальным источником инициируется эндотермический процесс термической деструкции ПММА. Выделяющиеся газообразные продукты пиролиза полимера за счет диффузионно-конвективного массопереноса перемешиваются с воздухом. При достижении достаточных для воспламенения значений концентрации горючих компонентов и температуры газовой смеси реакция окисления принимает необратимый характер. В результате происходит газозафазное зажигание (в момент времени  $t_d$ ).

Процессы теплопереноса и термического разложения в конденсированной фазе, а также

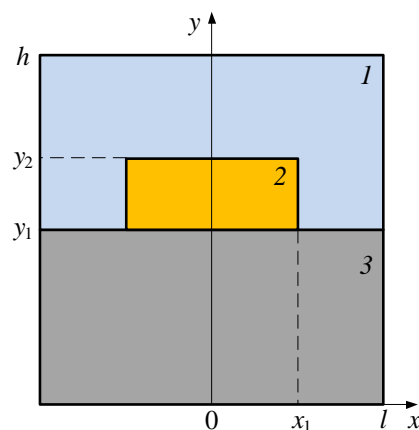


Рис. 1. Схема области решения задачи при  $t_r < t_d$ : 1 – газовая смесь, 2 – горячая частица, 3 – полимерный материал

тепломассопереноса и окисления в газовой среде описывает система нелинейных, нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, аналогичная модели [1].

**Результаты и их обсуждение.** Математическое моделирование процесса зажигания выполнено при теплофизических характеристиках и кинетических параметрах [2, 3], соответствующих термическому разложению ПММА и окислению продуктов деструкции полимера в газовой среде. Начальная температура воздуха и ПМ  $T_0=300$  К, источника энергии  $T_p=700\div 1500$  К; температура пиролиза ПММА  $T_r=500$  К; размеры «горячей» частицы  $x_p=2,5$  мм,  $y_p=2,5$  мм; размеры области решения  $l=10$  мм,  $h=11$  мм.

Известно [4], что стационарное горение ПМ типа полиметилметакрилата возможно при глубине «активного пиролиза» приповерхностного слоя не менее  $(1\div 2)\cdot 10^{-2}$  мм. Вполне обоснованно предположить, что размер зоны пиролиза ПМ  $\Delta y_r=10^{-2}$  мм в момент воспламенения можно принять в качестве первого приближения при выборе параметра, характеризующего устойчивость зажигания.

В таблице 1 приведены значения времени задержки зажигания ( $t_d$ ), глубин прогрева ( $y_w$ ) и пиролиза ( $y_r$ ) ПММА при изменении начальной температуры источника энергии ( $T_p$ ). Последняя характеризует энергетический запас «горячей» частицы [5] и, как следствие, развитие исследуемого процесса. При варьировании температуры источника установлены следующие режимы: газификация с последующим прекращением пиролиза ( $T_p < 700$  К), устойчивое зажигание ( $700 \text{ К} \leq T_p \leq 1500$  К), неустойчивое зажигание – вспышка ( $T_p > 1500$  К).

Таблица 1

*Время задержки зажигания, глубины прогрева и пиролиза в момент зажигания ПММА при изменении начальной температуры источника энергии*

$T_p$ , К	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
$t_d$ , с	0,0504	0,0167	0,0098	0,0075	0,0059	0,0049	0,0041	0,0032	0,0024
$y_w$ , мм	0,301	0,179	0,145	0,125	0,112	0,104	0,098	0,094	0,077
$y_r$ , мм	0,0209	0,0167	0,0152	0,0146	0,0140	0,0137	0,0135	0,0133	0,0126

Для первого из перечисленных режимов относительно длительная (более 0,2 с) стадия инертного прогрева ПМ сопровождается значительным отводом тепла от источника энергии вдоль продольной и поперечной координат. При выполнении условий газификации полимера энергии «горячей» частицы из-за снижения ее температуры недостаточно для увеличения скорости реакции термического разложения ПМ и соответственно интенсивности вдува горючих газов в среду окислителя. С течением времени происходит монотонное затухание процесса пиролиза.

При устойчивом зажигании ПМ в результате инертного прогрева приповерхностного слоя и его последующей газификации в окружающей среде (рис. 1) формируется смесь горючего и окислителя. Тепло, выделяющееся при окислении газообразных продуктов термического разложения полимера, обеспечивает непрерывный прогрев вещества в окрестности зоны активного пиролиза  $\Delta y_r$ , а также интенсивную газификацию ПМ. Эти процессы в совокупности обуславливают распространение пламени по поверхности материала.

Последний из установленных режимов соответствует неустойчивому зажиганию. При взаимодействии ПММА с источником энергии вблизи границы  $y=y_1$  (рис. 1) формируются высокие температурные градиенты. Скорость прогрева приповерхностного слоя ПМ до температуры пиролиза превосходит аналогичную величину для рассмотренных выше режимов. При этом глубина зоны активного пиролиза настолько мала ( $\Delta y_r < 10^{-2}$  мм), что при выполнении условий зажигания происходит

быстрое сгорание смеси окислителя с продуктами термического разложения ПМ, а интенсивность вдува последних в газовую среду недостаточна для поддержания устойчивого процесса горения.

На рис. 2 представлены профили температуры системы «частица – ПМ – газ» на оси симметрии ( $x = 0$ ) в момент зажигания для трех значений  $T_p$  локального источника.

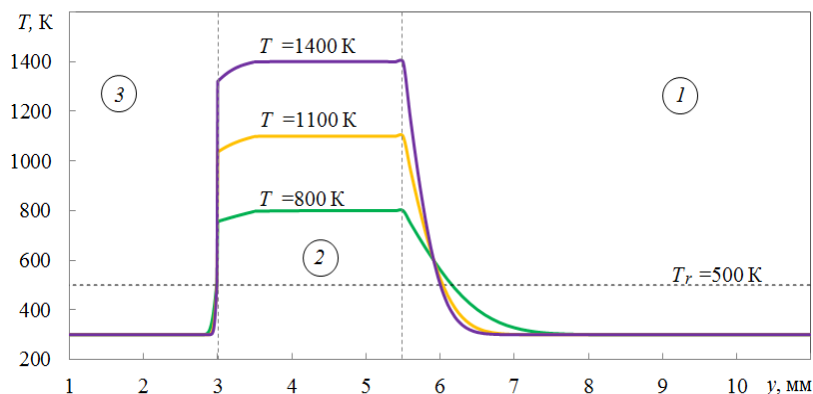


Рис. 2. Профили температуры системы «частица – ПМ – газ» при  $x = 0$  в момент зажигания  $t_d=0,0167$  с,  $T_p=800$  К,  $t_d=0,0059$  с,  $T_p=1100$  К,  $t_d=0,0032$  с,  $T_p=1400$  К: 1 – смесь газообразных продуктов пиролиза с окислителем, 2 – стальная частица, 3 – ПММА

Видно, что при повышении начальной температуры стальной частицы возрастает скорость прогрева приповерхностного слоя ПМ. Однако из-за значительного уменьшения длительности индукционного периода (на 95 %) при изменении  $T_p$  от 700 К до 1500 К глубина зоны термического разложения ПММА уменьшается. Следует отметить, что минимальное значение  $y_r=1,26 \cdot 10^{-2}$  мм в момент зажигания ПММА при  $T_p=1500$  К сопоставимо с глубиной зоны активного пиролиза  $\Delta y_r=(1 \div 2) \cdot 10^{-2}$  мм [4] при стационарном горении полимера. Это позволяет сделать вывод о возможности устойчивого зажигания ПММА в результате его локального нагрева источником ограниченной энергоемкости (рис. 1). Достаточно длительная стадия инертного прогрева приповерхностного слоя ПМ (до 85 % от  $t_d$ ) создает благоприятные условия (за счет формирования зон прогрева и пиролиза), необходимые для последующего распространения пламени по поверхности вещества.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-2391.2014.8).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glushkov D. O., Strizhak P. A. Heat and mass transfer at ignition of solid condensed substance with relatively low calorific power by a local energy source // Journal of Engineering Thermophysics. – 2012. Vol. 21, No. 1. – P. 69–77.
2. Bhattacharjee S., King M. D., Paolini C. Structure of downward spreading flames: a comparison of numerical simulation, experimental results and a simplified parabolic theory // Combustion Theory and Modelling. – 2004. – Vol. 8, No. 1. – P. 23–39.
3. Wu K. K., Fan W. F., Chen C. H., Liou T. M., Pan, I. J. Downward flame spread over a thick PMMA slab in an opposed flow environment: experiment and modeling // Combustion and Flame. – 2003. – Vol. 132, No. 4. – P. 697–707.

«ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

4. Асеева Р. М., Зайков Г. Е. Горение полимерных материалов. – М.: Наука, 1981. – 280 с.
5. Vilyunov V. N., Zarko V. E. Ignition of Solids – Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989. – 442 p.