

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЗАЖИГАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ТОПЛИВ ЛОКАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

Д.О. Глушков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

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

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

**MATHEMATICAL MODELLING  
OF SYNTHETIC FUELS IGNITION BY LOCAL HEAT SOURCES**

D.O. Glushkov

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

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

***Abstract.** The numerical study is executed for polymethylmethacrylate ignition (typical model fuel for hybrid rocket motors) by single particles in the shape of parallelepiped, polyhedron, and disk. The initial temperature of heat source is varied in the range of 950–1150 K, the size of hot particle is varied in the range of 2–6 mm. It is found that the change of these parameters significantly affect on the basic characteristics of the process – ignition delay time at conditions close to the critical ignition conditions. For considered particles with different shapes ignition delay time are arranged in ascending order: parallelepiped, polyhedron, and disk. Three ignition mode of polymer is studied. They are characterized by an initial temperature of the heat source, the ignition delay time and the position of the ignition zone in the vicinity of a hot particle. It is shown that taking into account the dependence of thermophysical characteristics on the temperature of polymer increase the ignition delay time due to the increasing of accumulated energy by near-surface layer.*

Задача зажигания полиметилметакрилата (ПММА) одиночными стальными частицами решалась в двумерной постановке. В качестве локальных источников энергии рассматривались частицы в форме параллелепипеда (рис. 1а), многогранника (рис. 1б), диска (рис. 1в) с одинаковыми размерами  $x_p$  и  $y_p$ . Задачи для частиц в форме параллелепипеда и многогранника решались в декартовой системе координат, диска – в цилиндрической системе координат. Оси координат совпадали с осями симметрии локальных источников энергии.

В начальный момент времени частица с температурой  $T_p$ , намного превышающей температуру  $T_0$  полимерного материала, находится на его поверхности в условиях идеального теплового контакта. В результате кондуктивной теплопередачи происходит прогрев тонкого приповерхностного слоя ПММА. С увеличением температуры растет скорость термического разложения полимерного материала, выделяются летучие. Наиболее интенсивно этот процесс протекает в приповерхностном слое ПММА в окрестности границы контакта с горячей частицей  $0 < x < x_1$  (рис. 1), где температура достигает 500–600 К. Продукты термического разложения полимера вдуваются в окружающую среду из-под локального источника энергии в малой окрестности его основания  $x_1 < x < x_1 + \varepsilon$ . Горючая газовая смесь формируется в результате смешения летучих с окружающим воздухом за счет диффузии. Дополнительный прогрев

газовой смеси происходит при ее движении вдоль боковых граней горячей частицы  $y_1 < y < y_2$  (рис. 1). Когда в смеси летучих с воздухом достигаются условия воспламенения инициируется газофазное загорание.

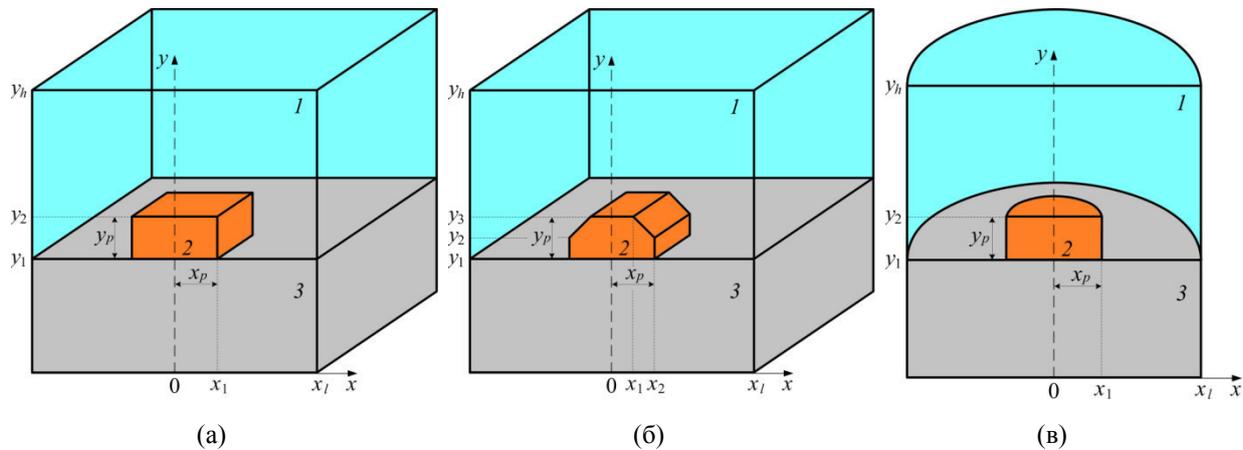


Рис. 1. Схема области решения задачи загорания полимерного материала локальным источником в форме параллелепипеда (а), многогранника (б), диска (в):

1 – газ, 2 – горячая частица, 3 – полимерный материал

С учетом пространственно-временной неоднородности процессов тепломассопереноса приняты следующие условия загорания:

1. Тепло, выделяемое в результате реакции окисления летучих, больше энергии, отводимой от горячей частицы в полимер и газовую смесь.
2. Температура газовой смеси в зоне интенсивного развития реакции окисления превышает начальную температуру локального источника энергии.

Математическая модель исследуемого процесса представляет собой систему нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями [1]. Алгоритм решения основан на методе конечных разностей. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решены локально-одномерным методом. Система одномерных разностных уравнений решена методами итераций и прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы. Тестирование выбранных методов и элементов разработанного алгоритма решения системы дифференциальных уравнений осуществлялось на примере группы менее сложных задач теплофизики и химической кинетики. Принимались следующие параметры разностной и временной сеток: шаг по пространственным координатам  $\Delta x = \Delta y = 50$  мкм, шаг по времени  $\Delta t = 10$  мкс. Выбор таких параметров обусловлен наличием существенных градиентов по температуре и концентрации летучих в области решения задачи (рис. 1), особенно в окрестности границы контакта горячей частицы с поверхностью полимерного материала ( $y = y_1, 0 < x < x_1$ ). Пространственная и временная дискретизация позволяет ограничить влияние существенных тепловых эффектов, обусловленных термическим разложением полимерного материала и окислением летучих, на устойчивость алгоритма численного решения. Также малые значения шагов по координате и времени позволяют получить результаты с высокой точностью. Уменьшение шагов  $\Delta x$  и  $\Delta y$  от 100 до 50 мкм и  $\Delta t$  от 20 до 10 мкс ведет к изменению результатов численного исследования не более чем на 0.5 %. При этом погрешность выполнения закона сохранения энергии в области решения задачи не превышает 1.5 %.

Численные исследования выполнены при начальных температурах воздуха и полимерного материала  $T_0=300$  К, горячей частицы  $T_p=950-1150$  К. Размеры области решения (рис. 1) задачи зажигания  $x_l=y_l=20$  мм, размеры горячих частиц  $x_p=y_p=2$  мм. Для частиц в форме многогранника (рис. 1б)  $x_1=x_p/2$ ,  $y_2=y_1=y_p/2$ . Теплофизические свойства веществ и кинетические характеристики процессов термического разложения и окисления приведены в [1].

На рис. 2 приведены зависимости времен задержки зажигания ПММА от начальной температуры горячей частицы в форме параллелепипеда (рис. 1а) при изменении размера частицы  $x_p$  от 2 до 6 мм.

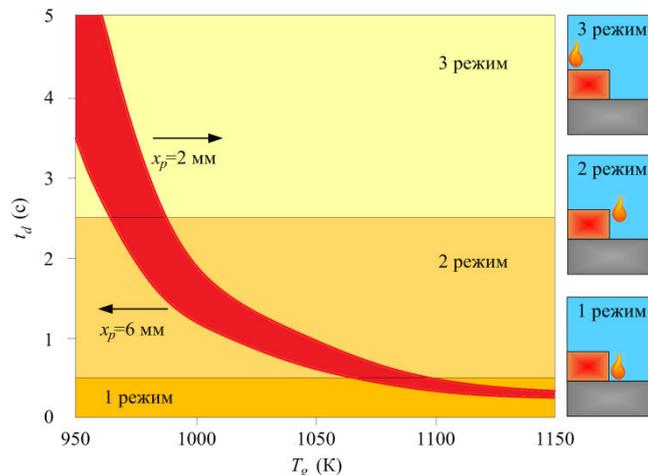


Рис. 2. Зависимость времени задержки зажигания ПММА от начальной температуры частиц в форме параллелепипеда при изменении  $x_p$  от 2 до 6 мм

Выявлены три режима зажигания. Условно им присвоены названия (рис. 2): 1 режим, 2 режим, 3 режим. Эти режимы характеризуются взаимосвязанными параметрами локального источника энергии (начальная температура) и процесса зажигания (время задержки зажигания, расположение зоны зажигания в окрестности горячей частицы). При  $T_p > 1100$  К,  $t_d < 0.5$  с (1 режим) зона зажигания расположена у основания горячей частицы ( $x_1 < x < x_1 + \epsilon$ ,  $y \rightarrow y_1$ ). При  $975 < T_p < 1100$  К,  $0.5 < t_d < 2.5$  с (2 режим) зона зажигания расположена около боковой грани горячей частицы ( $x \rightarrow x_1$ ,  $y_1 < y < y_2$ ). При  $T_p < 975$  К,  $t_d > 2.5$  с (3 режим) зона зажигания расположена над горячей частицей ( $x \rightarrow 0$ ,  $y > y_2$ ).

Варьирование параметров (размеры и форма) локального источника энергии в достаточно широких диапазонах приводит к изменению предельных значений начальных температур, соответствующих разным режимам зажигания. Изменение теплофизических характеристик ПММА при его нагреве влияет на увеличение времен задержки зажигания на 15–25 % вследствие повышения аккумулирующей способности прогретой области ПМ и увеличения теплоотвода за счет теплопроводности из приповерхностного слоя полимера при температурах не более 400 К.

*Исследование выполнено при поддержке РНФ (проект № 15-19-10003).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Ignition of Polymeric Material with Single Hot Metallic and Nonmetallic Particles under Diffusive-Convective Heat and Mass Transfer in an Oxidizing Medium // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2014. – V. 8. – No. 5. – P. 664–671.