

**ЗАЖИГАНИЕ ТВЕРДОГО КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЕЩЕСТВА ЛОКАЛЬНЫМ
ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ НЕИДЕАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТАКТА**

Глушков Д.О.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: dmitriyog@tpu.ru

**SOLID CONDENSED SUBSTANCE IGNITION BY LOCAL HEAT SOURCES UNDER CONDITIONS
OF NONIDEAL THERMAL CONTACT**

Glushkov D.O.

Tomsk Polytechnic University,
Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: dmitriyog@tpu.ru

Разработана математическая модель твердофазного зажигания конденсированного вещества горячей металлической частицей в форме диска при учете неидеального теплового контакта на границе «частица – топливо» вследствие естественной шероховатости поверхности последнего. Установлены диапазоны изменения начальной температуры источника энергии и параметра, характеризующего шероховатость поверхности топлива, при которых лучистый теплообмен в области газового зазора между частицей и топливом влияет на времена задержки зажигания.

Mathematical model of a solid-phase condensed substance ignition by a hot metal particle in disk-shape is executed in conditions of imperfect thermal contact on the particle – composite propellant border, caused by a natural roughness of a composite propellant surface. Ranges of local heat source initial temperature and parameter characterizing a roughness of composite propellant surface are established at which radiative heat transfer in the field of a gas gap between a particle and a solid propellant influences on ignition time delay.

Численное исследование интегральных характеристик зажигания высокоэнергетического материала (перхлорат аммония + 14 % бутилкаучук + 6 % хиноловый эфир) выполнено на примере системы «горячая частица – смесевое топливо – инертный газ». В качестве локального источника ограниченной энергоемкости рассматривалась нагретая до высоких температур ($T_p=800\div1500$ К) стальная частица в форме диска.

Принята следующая модель процесса. В начальный момент времени ($t=0$) горячая частица находится на поверхности топлива с температурой $T_0 \ll T_p$ (рис. 1). Условия теплового контакта на границе «частица – топливо» неидеальны. По результатам экспериментальных исследований [1] установлено, что из-за естественной шероховатости поверхности всех смесевых твердых топлив (гранулы окислителя, например, перхлората аммония выступают над границей раздела «топливо – окружающая среда») образуется газовый зазор толщиной несколько микрон (или даже несколько десятков микрон) между источником нагрева и конденсированным веществом.

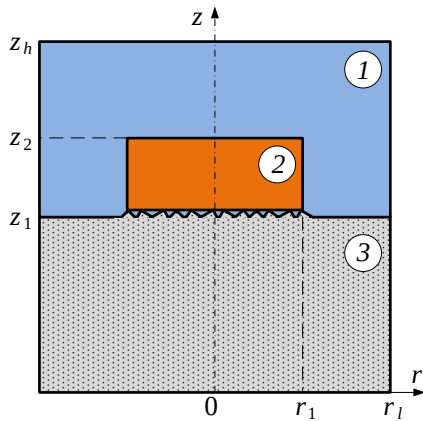


Рис. 1. Схема области решения задачи зажигания: 1 – инертный газ, 2 – горячая частица, 3 – смесевое твердое топливо

За счет теплопроводности и излучения теплота горячей частицы отводится в смесевое топливо и инертный газ. В результате теплопереноса в рассматриваемой системе (рис. 1) перераспределяется энергия между источником нагрева и «холодными» в начальный момент времени компонентами (топливо и газ). Из-за относительно низкой температуропроводности смесевое топливо ($a_3=1,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$) его приповерхностный слой аккумулирует теплоту преимущественно в непосредственной близости от границы нагрева. Рост температуры топлива инициирует экзотермический процесс взаимодействия горючего компонента (бутилкаучук) и окислителя (перхлорат аммония). Его скорость экспоненциально возрастает по аррениусовской зависимости [2]. Зажигание смесевое твердого топлива происходит при достижении предельных условий, соответствующих критериям зажигания [2]:

1. Скорость теплоприхода в системе (рис. 1) за счет экзотермической реакции, протекающей в приповерхностном слое конденсированного вещества, превосходит скорость теплоотвода от горячей частицы в топливо.

2. Температура в зоне локализации ведущей реакции окисления превышает температуру источника энергии.

Для численного решения задачи зажигания смесевое твердого топлива локальным источником нагрева (рис. 1) разработана математическая модель (аналогично [3]), учитывающая взаимосвязанные физико-химические процессы теплопроводности в горячей частице, топливе и газе, кондуктивно-лучистого теплообмена на границе источника энергии с внешней средой, а также экзотермического реагирования в приповерхностном слое конденсированного вещества.

Численные исследования выполнены при следующих параметрах: начальная температура смесевое топлива и инертного газа $T_0=293 \text{ К}$, стальной частицы $T_p=800 \div 1500 \text{ К}$; размеры частицы $r_p=3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $z_p=3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; размеры области решения $r_l=0,01 \text{ м}$, $z_h=0,01 \text{ м}$; степень черноты частицы $\varepsilon=0,55$; параметр, учитывающий шероховатость поверхности топлива $\varphi=0,1 \div 1$ (при $\varphi \rightarrow 1$ условия теплового контакта на границе «частица – топливо» близки к идеальным).

Теплофизические характеристики веществ (рис. 1):

$$\lambda_1=0,026 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \rho_1=1,161 \text{ кг}/\text{м}^3; C_1=1190 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$\lambda_2=49 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \rho_2=7831 \text{ кг}/\text{м}^3; C_2=470 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$\lambda_3=0,418 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \rho_3=1750 \text{ кг}/\text{м}^3; C_3=1260 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

$$\text{Кинетические параметры экзотермического процесса } E_3=50 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль, } Q_3 k_3^0=0,88 \cdot 10^9$$

Дж/(кг·с).

В табл. 1 приведены зависимости времени задержки зажигания (t_d) смесового топлива от безразмерного параметра (φ) при начальной температуре горячей частицы $T_p=800$ К.

Таблица 1

Времена задержки зажигания в зависимости от безразмерного параметра, характеризующего степень шероховатости поверхности топлива, при $T_p=800$ К

φ	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
t_d^* , с	11,374	8,296	6,552	5,526	4,867	4,428	4,071
t_d^{**} , с	9,948	7,461	5,965	5,079	4,532	4,166	3,879

t_d^* – времена задержки зажигания при кондуктивном теплообмене на границе «частица – топливо»;

t_d^{**} – времена задержки зажигания при радиационно-кондуктивном теплообмене на границе «частица – топливо».

В условиях идеального контакта источника энергии и конденсированного вещества теплота поступает в зону экзотермической реакции только за счет теплопроводности. Уменьшение площади контакта частицы и топлива ($0 < \varphi < 1$) вследствие естественной шероховатости его поверхности (из-за частиц перхлората аммония) ведет к изменению условий теплообмена и значений основной интегральной характеристики процесса – времени задержки зажигания по сравнению со случаем идеального теплового контакта. Часть теплоты передается от источника в топливо теплопроводностью, а часть – за счет излучения (в областях газового зазора толщиной в единицы или десятки микрон). Видно (табл. 1), что лучистый теплообмен на поверхности источника влияет на интенсивность процесса теплопередачи в зону экзотермической реакции. Времена задержки зажигания (t_d^{**}) имеют меньшие значения (при $\varphi = \text{const}$ и $T_p = \text{const}$) по сравнению с аналогичной величиной (t_d^*). Более интенсивный радиационно-кондуктивный теплообмен ведет к снижению длительности индукционного периода ($t_d^{**} < t_d^*$). Установленная особенность, характеризуемая величиной γ ($\gamma = (t_d^* - t_d^{**}) / t_d^* \cdot 100$ %), явно выражена ($\gamma = 5 \div 25$ %) при параметрах φ и T_p близких к предельным условиям зажигания смесового топлива. В области относительно высоких начальных температур источника $T_p = 1300 \div 1500$ К при $\varphi > 0,2$ отклонения времен задержки зажигания γ не превышают 2 %.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Захаревич А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Зажигание модельных смесовых топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44. – № 5. – С. 54–57.
2. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987.
3. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Об устойчивости зажигания смесового твердого топлива локальным источником ограниченной энергоемкости // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50. – № 6. – С. 54–60.