

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА ГОРЯЧЕЙ  
ЧАСТИЦЕЙ ПРИ НЕИДЕАЛЬНОМ ТЕПЛОВОМ КОНТАКТЕ**

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)

**NUMERICAL INVESTIGATION OF A COMPOSITE PROPELLANT IGNITION BY A HOT  
PARTICLE UNDER IMPERFECT THERMAL CONTACT CONDITIONS**

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.** *The mathematical model of the solid-phase condensed substance ignition by a metal particle heated to high temperatures in disk-shape was developed under the imperfect thermal contact conditions on the particle – composite propellant border, caused by a natural roughness of a composite propellant surface. The results of numerical research allowed to determine the ranges of energy source initial temperature and parameter characterizing a roughness of composite propellant surface at which radiative transfer in the field of a gas gap between a particle and solid propellant significantly (up to 25 %) influences values of the main integral characteristic of process – an ignition delay time.*

Исследование физико-химических закономерностей и интегральных характеристик процесса зажигания твердого конденсированного вещества (перхлорат аммония + 14 % бутилкаучук + 6 % хиноловый эфир) выполнено на примере системы «горячая частица – смешевое топливо – инертный газ» (рис. 1). В качестве локального источника ограниченной энергоемкости рассматривалась нагретая до высоких температур ( $T_p=800\div 1500$  К) стальная частица в форме диска.

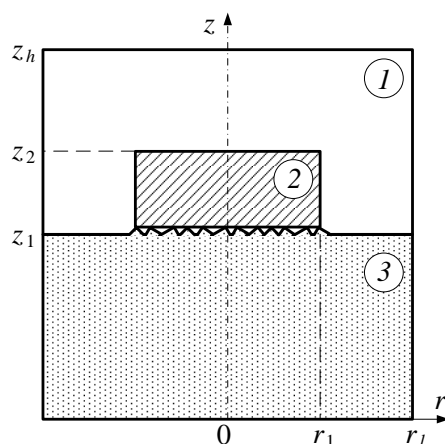


Рис. 1. Схема области решения задачи зажигания:

1 – инертный газ, 2 – «горячая» частица, 3 – смешевое твердое топливо

## «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

Для численного решения задачи зажигания смесового твердого топлива локальным источником нагрева (рис. 1) разработана математическая модель аналогичная [1], 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. Оценка адекватности результатов численного исследования выполнена проверкой консервативности используемой разностной схемы аналогично методике, разработанной авторами [2].

Математическое моделирование выполнено при следующих параметрах: начальная температура смесового топлива и инертного газа  $T_0=293$  К, стальной частицы  $T_p=800\div 1500$  К; размеры частицы  $r_p=3\cdot 10^{-3}$  м,  $z_p=3\cdot 10^{-3}$  м; размеры области решения  $r_l=0,01$  м,  $z_l=0,01$  м; степень черноты частицы  $\varepsilon=0,55$ ; параметр, учитывающий шероховатость поверхности топлива  $\varphi=0,1\div 1$ . Теплофизические характеристики веществ (рис. 1) и кинетические параметры экзотермического процесса  $E_3=50\cdot 10^3$  Дж/моль,  $Q_3k_3^0=0,88\cdot 10^9$  Дж/(кг·с) аналогичны [1].

На рис. 2 приведены зависимости времени задержки зажигания ( $t_d$ ) смесового топлива от безразмерного параметра ( $\varphi$ ) для трех различных значений начальной температуры «горячей» частицы. 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. Часть теплоты передается от источника в топливо теплопроводностью, а часть – за счет излучения (в областях газового зазора толщиной в единицы или десятки микрон).

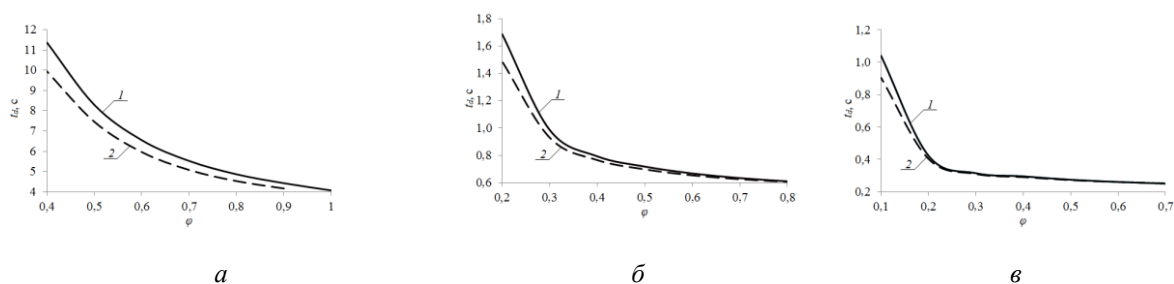


Рис. 2. Времена задержки зажигания в зависимости от безразмерного параметра, характеризующего степень шероховатости поверхности топлива, при  $T_p=800$  К (а),  $T_p=1100$  К (б),  $T_p=1400$  К (в) в условиях теплопередачи в зону экзотермической реакции: 1 – теплопроводностью (в окрестностях контакта и газового зазора), 2 – теплопроводностью и излучением (в окрестностях контакта и газового зазора соответственно)

Видно (рис. 2), 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 ( $t_d^*$ ), установленной при кондуктивном теплообмене на границе «частица – топливо». Более интенсивный радиационно-кондуктивный теплообмен ведет к снижению длительности индукционного периода ( $t_d^{**}<t_d^*$ ).

## «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

Установленная особенность, характеризуемая величиной  $\gamma$  ( $\gamma = (t_d^* - t_d^{**}) / t_d^* \cdot 100$  %), более явно выражена ( $\gamma = 5 \div 25$  %) при параметрах  $\varphi$  и  $T_p$  близких к предельным условиям зажигания смесового топлива. Например,  $\gamma = 15,4$  % при  $\varphi = 0,1$  и  $T_p = 1200$  К,  $\gamma = 19,2$  % при  $\varphi = 0,25$  и  $T_p = 960$  К,  $\gamma = 22,5$  % при  $\varphi = 0,3$  и  $T_p = 860$  К,  $\gamma = 24,8$  % при  $\varphi = 0,35$  и  $T_p = 800$  К. В области относительно высоких начальных температур источника  $T_p = 1300 \div 1500$  К при  $\varphi > 0,2$  отклонения времен задержки зажигания  $\gamma$  не превышают 2 %.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Твердофазное зажигание смесового топлива «горячей» частицей при свободно-конвективном теплоотводе во внешнюю среду // Химическая физика. 2014. Т. 33. № 4. С. 38–47.
2. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное решение задачи воспламенения жидкого пожароопасного вещества одиночной «горячей» частицей // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45. № 5. С. 42–50.