

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА ИСТОЧНИКОМ ОГРАНИЧЕННОГО ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ ПРИ УЧЕТЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ И ВЕЩЕСТВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

ГЛУШКОВ Д.О., КРАВЧЕНКО Е.В., СТРИЖАК П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

---

**АННОТАЦИЯ.** Выполнено математическое моделирование процесса зажигания типичного металлизированного твердого топлива широко распространенным источником ограниченного теплосодержания – разогретой до высоких температур металлической частицей в форме параллелепипеда малых размеров. Численные исследования проведены в рамках модели, учитывающей в явной форме зависимость теплофизических характеристик материалов и веществ от температуры, а также структурную неоднородность топлива, обусловленную включениями частиц алюминия. Определены основные интегральные характеристики процесса зажигания структурно-неоднородного топлива локальным источником энергии.

---

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** зажигание, металлизированное топливо, локальный источник энергии, температура, теплофизические характеристики.

### ВВЕДЕНИЕ

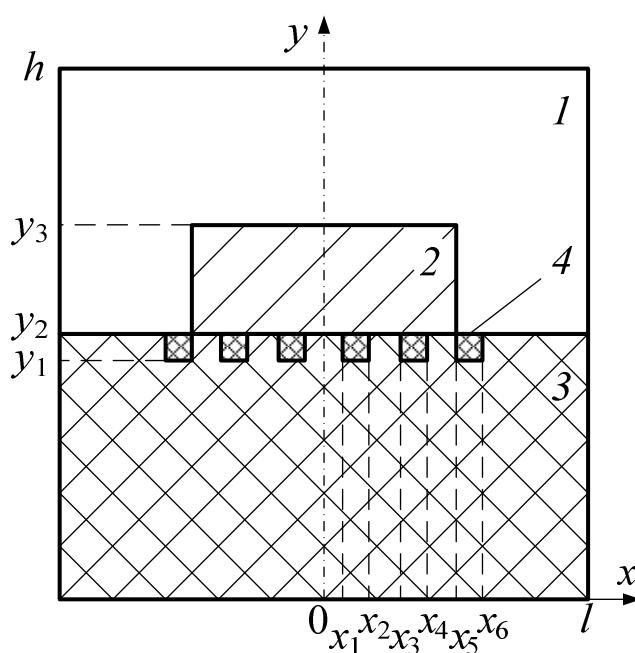
При анализе условий и характеристик зажигания специальных высокоэнергетических материалов [1] одной из важнейших задач является повышение точности прогноза основной характеристики процесса – времени задержки зажигания, например, смесового твердого топлива (СТТ) [1]. При этом [2] важным является максимально возможное упрощение схемы и снижение материальных затрат на обеспечение условий стабильного зажигания СТТ. В этой связи перспективными являются локальные источники нагрева высокоэнергетических материалов – «горячие» одиночные частицы металлов.

В последние годы в результате теоретических [3–16] и экспериментальных [17, 18] исследований установлены основные макроскопические закономерности зажигания представительной группы твердых [6–13, 16, 17] и жидких [3–5, 14, 15, 18] высокоэнергетических материалов источниками ограниченного теплосодержания (разогретыми до высоких температур металлическими и неметаллическими частицами малых размеров в форме параллелепипеда, многогранника, цилиндра, полусферы). Определены [3–18] зависимости интегральных характеристик зажигания от большой группы факторов (теплосодержание «горячей» частицы, диффузионный и конвективный теплоперенос в окружающей среде, условия контакта источника зажигания с поверхностью вещества, внедрение в приповерхностный слой и кристаллизация материала источника нагрева, теплофизические и термохимические характеристики, структурная неоднородность вещества), характеризующих условия прогрева топлива и последующего стабильного зажигания. При численном исследовании [11–13] процессов зажигания твердых конденсированных веществ использовались математические модели реальных физических процессов, в которых не учитывалось изменение теплофизических характеристик (теплопроводности –  $\lambda$ , удельной теплоемкости –  $C$ ) материалов и веществ в течение всего индукционного периода. В то же время возможно достаточно значимое (до 11 %) уточнение численных значений времен задержки зажигания жидкого конденсированного вещества при учете зависимостей хотя бы  $\lambda=f(T)$  в системе «топливо – локальный источник энергии – окислитель» [14]. По этим причинам представляет интерес анализ влияния учета в математической модели зависимости теплофизических характеристик материалов и веществ от температуры в процессе нагрева смесового твердого топлива на интегральные характеристики его зажигания.

Целью данной работы является численное исследование макроскопических закономерностей процесса зажигания структурно-неоднородного металлизированного смесового твердого топлива нагретой до высоких температур частицей металла при учете зависимости теплофизических характеристик материалов и веществ от температуры.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Моделирование исследуемых физико-химических процессов проводилось в системе «смесовое твердое топливо – источник ограниченного теплосодержания – воздух», условная схема которой изображена на рис. 1.



1 – воздух, 2 – «горячая» стальная частица,  
3 – «связка» горючего и окислителя, 4 – частица алюминия

**Рис. 1.** Схема области решения задачи зажигания металлизированного смесового твердого топлива

В качестве источника нагрева рассматривалась разогретая до высоких температур стальная частица малых размеров в форме параллелепипеда. Численные исследования выполнены на примере типичного смесового топлива [17] с известными теплофизическими и термохимическими характеристиками.

Возможны несколько подходов к моделированию гетерогенной структуры реального металлизированного СТТ. Самой простой в реализации является модель, в основе которой лежит предположение о возможности интерпретации металлизированного топлива как среды с «эффективными» теплофизическими характеристиками. Значения этих характеристик могут быть определены из расчетных выражений [11].

Второй подход заключается в учете реальной неоднородной («гетерогенной») структуры СТТ. При этом в области решения выделяются участки, соответствующие частицам металла (алюминия), а также «связке» вещества, способного к экзотермическому реагированию (например, бутилкаучука), с окислителем (например, перхлоратом аммония).

Представляется целесообразным сравнение характеристик индукционного процесса, полученных при численном анализе с использованием двух вышеописанных моделей. Не менее интересно установление масштабов влияния изменения теплофизических характеристик (теплопроводность, удельная теплоемкость) материалов и веществ в зависимости от температуры на интегральные времена задержки зажигания.

В рамках сформулированных моделей, аналогичных [11–13], предполагалась реализация следующей схемы исследуемого процесса. В начальный момент времени ( $t=0$ )

разогретая до высоких температур металлическая частица инерционно осажается на поверхность металлизированного топлива (рис. 1). Последнее нагревается за счет кондуктивного отвода энергии, аккумулированной в «горячей» частице. При прогреве топлива скорость экзотермической реакции в приповерхностном слое экспоненциально возрастает по закону Аррениуса и приобретает необратимый характер – происходит зажигание.

Численный анализ исследуемого процесса выполнен при следующих допущениях:

1. Форма частицы после осаждения на поверхность топлива не изменяется. Для частиц, находящихся в момент осаждения в твердом состоянии и имеющих относительно невысокие скорости движения, такое допущение является обоснованным.

2. Прилегающий к поверхности слой топлива находится в недеформированном состоянии, и после выпадения частицы не происходит деформации этой поверхности (частица не углубляется в приповерхностный слой). Размягчение многих конденсированных веществ при высоких температурах ( $800 \div 1500$  К) не сопровождается деформацией приповерхностного слоя, т.к. глубина размягчения в течение непродолжительного индукционного периода очень мала по сравнению с размерами частицы и не превышает сотой доли миллиметра.

3. Не учитывается возможное выгорание топлива. Оценка масштабности этого процесса проведена авторами [15, 16]. Установлено, что в большинстве случаев при локальном нагреве в течение достаточно малых времен (менее 0,5 с) процесс выгорания приповерхностного слоя топлива несущественно влияет на интегральные характеристики зажигания.

4. Кинетические параметры экзотермической реакции, протекающей в приповерхностном слое СТТ, постоянны. Предполагается реализация одной «эффективной» реакции, в которой участвует одно способное к экзотермическому реагированию вещество.

Анализ [3–8] процессов зажигания высокоэнергетических материалов типичными источниками ограниченного теплосодержания показал, что использование при численном моделировании только одного из известных [1, 19] критериев зажигания (В.Н. Вилюнова, Я.Б. Зельдовича, А.А. Ковальского, Д.А. Франк-Каменецкого) не позволяет учесть специфические особенности процессов теплопереноса в системе (рис. 1), связанные с остыванием локального источника энергии.

Поэтому при численном моделировании использовалась следующая совокупность критериев зажигания:

1. Энергия, выделяемая в результате экзотермической реакции в приповерхностном слое топлива, больше теплоты, передаваемой от источника нагрева в зону реакции.

2. Температура топлива в зоне локализации ведущей экзотермической реакции выше начальной температуры «горячей» частицы.

Следует отметить, что принятые критерии зажигания достаточно хорошо зарекомендовали себя при теоретическом изучении процессов зажигания как твердых, так и жидких конденсированных веществ источниками ограниченного теплосодержания. Хорошая сходимость результатов численных [11–13] и экспериментальных исследований [14] является подтверждением правомерного использования несколько модифицированных классических критериев зажигания.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Задача зажигания металлизированного СТТ решена в осесимметричной постановке в декартовой системе координат, начало которой совпадает с осью симметрии «горячей» частицы. Комплекс процессов теплопереноса с экзотермическим реагированием в приповерхностном слое топлива при  $0 < t < t_d$  (рис. 1) описывается следующей системой нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, удовлетворяющих основным положениям общей теории теплопередачи в химической кинетике [19].

Уравнение теплопроводности для воздуха ( $x_5 < x < l$ ,  $y_2 < y < y_3$ ;  $0 < x < l$ ,  $y_3 < y < h$ ):

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \right). \quad (1)$$

Уравнение теплопроводности для «горячей» частицы ( $0 < x < x_5$ ,  $y_2 < y < y_3$ ):

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \right). \quad (2)$$

Уравнение энергии для «связки» горючего и окислителя ( $0 < x < l$ ,  $0 < y < y_1$ ;  $0 < x < x_1$ ,  $x_2 < x < x_3$ ,  $x_4 < x < x_5$ ,  $x_6 < x < l$ ,  $y_1 < y < y_2$ ):

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \right) + Q_3 W_3. \quad (3)$$

Уравнение теплопроводности для частиц алюминия ( $x_1 < x < x_2$ ,  $x_3 < x < x_4$ ,  $x_5 < x < x_6$ ,  $y_1 < y < y_2$ ):

$$\rho_4 C_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} \right). \quad (4)$$

Массовая скорость экзотермической реакции в приповерхностном слое СТТ определялась уравнением Аррениуса [19]:

$$W_3 = \rho_3 k_3^0 \exp \left( -\frac{E_3}{RT_3} \right).$$

Приняты обозначения:  $t_d$  – время задержки зажигания, с;  $x$ ,  $y$  – координаты декартовой системы, м;  $l$ ,  $h$  – размеры области решения, м;  $T_0$  – начальная температура воздуха, частиц алюминия, «связки» горючего и окислителя, К;  $T_p$  – начальная температура «горячей» частицы, К;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К);  $Q_3$  – тепловой эффект экзотермической реакции в приповерхностном слое топлива, Дж/кг;  $W_3$  – массовая скорость экзотермического реагирования «связки» горючего и окислителя, кг/(м<sup>3</sup>·с);  $k_3^0$  – предэкспоненциальный множитель, с<sup>-1</sup>;  $E_3$  – энергия активации экзотермической реакции, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); индексы «1», «2», «3», «4» соответствуют воздуху, «горячей» стальной частице, «связке» горючего и окислителя, частице алюминия.

Краевые условия для рассматриваемой задачи зажигания СТТ (рис. 1) имеют следующий вид.

Начальные ( $t=0$ ) условия:

$$T_1 = T_3 = T_4 = T_0, \quad 0 < x < l, \quad 0 < y < y_2; \quad x_5 < x < l, \quad y_2 < y < y_3; \quad 0 < x < l, \quad y_3 < y < h.$$

$$T_2 = T_p, \quad 0 < x < x_5, \quad y_2 < y < y_3.$$

Граничные условия при  $0 < t < t_d$ :

1. На оси симметрии и внешних границах для всех уравнений принимается условие равенства нулю градиентов температуры:

$$x=0, \quad 0 < y < h; \quad x=l, \quad 0 < y < h: \quad \frac{\partial T_i}{\partial x} = 0, \quad i = \overline{1,4}; \quad y=0, \quad 0 < x < l; \quad y=h, \quad 0 < x < l: \quad \frac{\partial T_i}{\partial y} = 0, \quad i = \overline{1,4}.$$

2. Тепловое взаимодействие между компонентами рассматриваемой системы описывается граничными условиями четвертого рода:

$$x=x_1, \quad x=x_3, \quad x=x_5, \quad y_1 < y < y_2: \quad T_3 = T_4, \quad -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x};$$

$$x=x_2, \quad x=x_4, \quad x=x_6, \quad y_1 < y < y_2: \quad T_4 = T_3, \quad -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x};$$

$$x=x_5, y_2 < y < y_3: T_2=T_1, -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x};$$

$$y=y_1, x_1 < x < x_2, x_3 < x < x_4, x_5 < x < x_6: T_3=T_4, -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y};$$

$$y=y_2, 0 < x < x_1, x_2 < x < x_3, x_4 < x < x_5: T_3=T_2, -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y};$$

$$y=y_2, x_5 < x < x_6: T_4=T_1, -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y};$$

$$y=y_2, x_6 < x < l: T_3=T_1, -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y};$$

$$y=y_3, 0 < x < x_5: T_2=T_1, -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}.$$

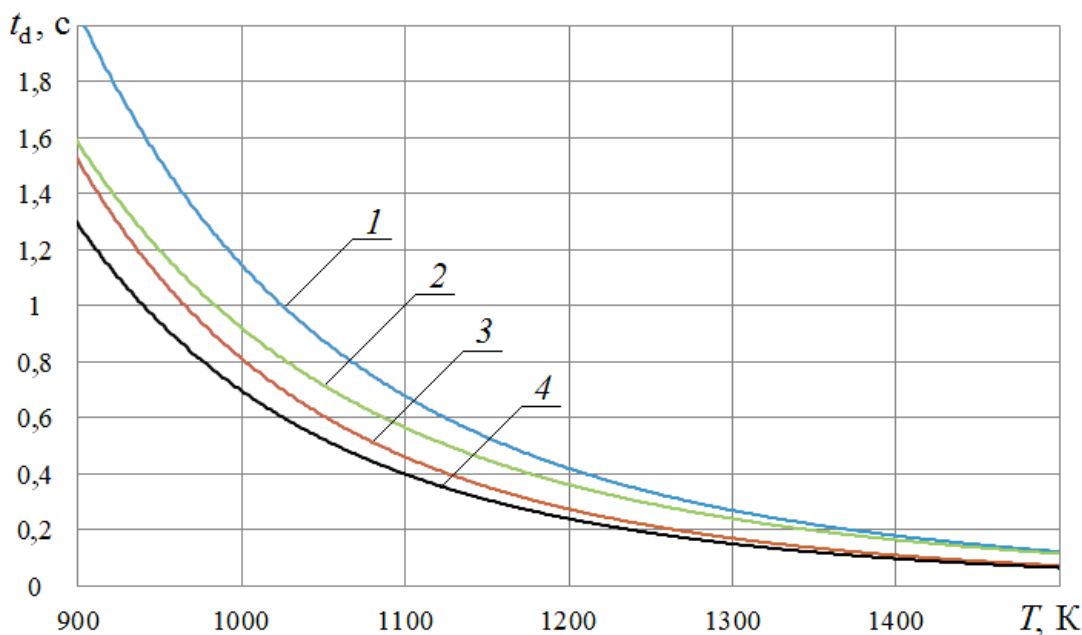
Система нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных (1)–(4), описывающая процесс зажигания металлизированного СТТ разогретой частицей в рамках рассматриваемой модели (рис. 1), с соответствующими начальными и граничными условиями решалась методом конечных разностей [20]. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решались локально-одномерным методом [20]. Для решения одномерных разностных уравнений применялся метод прогонки при использовании неявной четырехточечной разностной схемы [20]. Нелинейные уравнения решались методом итераций [21].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численное исследование процессов зажигания выполнено при следующих значениях параметров [2, 22–24]: начальные температуры воздуха, частиц алюминия, «связки» горючего и окислителя  $T_0=300$  К, стальной частицы  $T_p=900\div 1500$  К; тепловой эффект экзотермической реакции  $Q_3=3,298\cdot 10^3$  кДж/кг; энергия активации  $E_3=49,812$  кДж/моль; предэкспонент  $k_3^0=10^6$  с<sup>-1</sup>; размеры области решения  $l=10\cdot 10^{-3}$  м,  $h=20\cdot 10^{-3}$  м; размеры «горячей» стальной частицы  $l_p=2,5\cdot 10^{-3}$  м,  $h_p=2,0\cdot 10^{-3}$  м; размеры частиц алюминия  $l_g=h_g=0,1\cdot 10^{-3}$  м. Для определения значения теплофизических характеристик материалов и веществ в системе «смесевое твердое топливо – источник ограниченного теплосодержания – воздух» использовались аппроксимационные выражения, вычисленные по табличным [22–24] значениям соответствующих характеристик в диапазоне изменения температур  $300\text{ К} < T < 1500\text{ К}$ .

В результате проведенных численных исследований с использованием двух вышеописанных подходов к моделированию неоднородной структуры вещества установлены (рис. 2) зависимости времени задержки зажигания  $t_d$  металлизированного смесевого твердого топлива от начальной температуры локального источника энергии.

Выявлено, что при учете неоднородной структуры СТТ (кривые 3, 4 на рис. 2), интенсивность процесса зажигания превышает аналогичные показатели для гомогенной структуры вещества с усредненными теплофизическими характеристиками (кривые 1, 2 на рис. 2) как для варианта  $\lambda=\text{const}$ ,  $C=\text{const}$ , так и для случая  $\lambda=f(T)$ ,  $C=f(T)$ . Это обусловлено тем, что хотя через частицу алюминия, внедренную в приповерхностный слой СТТ (рис. 1), тепло локального источника энергии отводится вглубь топлива значительно быстрее, чем через «связку» горючего и окислителя, в зоне «связки» теплопроводность вещества низкая и температура приповерхностного слоя СТТ растет гораздо быстрее по сравнению с моделью для гомогенного вещества с эффективными теплофизическими характеристиками.



1 – при усреднении теплофизических характеристик СТТ ( $\lambda=\text{const}$ ,  $C=\text{const}$ );  
 2 – при усреднении теплофизических характеристик СТТ ( $\lambda=f(T)$ ,  $C=f(T)$ ); 3 – при учете структурной неоднородности СТТ ( $\lambda=\text{const}$ ,  $C=\text{const}$ ); 4 – при учете структурной неоднородности СТТ ( $\lambda=f(T)$ ,  $C=f(T)$ )

**Рис. 2. Зависимость времени задержки зажигания в системе «смесевое твердое топливо – источник ограниченного теплосодержания – воздух» от начальной температуры «горячей» частицы**

При относительно невысоких начальных температурах источника нагрева ( $T_p < 1300$  К) значения  $t_d$  для вариантов  $\lambda=\text{const}$ ,  $C=\text{const}$  и  $\lambda=f(T)$ ,  $C=f(T)$  отличаются более, чем на 11 % (рис. 2). Это вызвано тем, что стадия прогрева вещества при  $T_p < 1300$  К играет важную роль в общем комплексе процессов теплопереноса в малой окрестности источника нагрева. Относительный масштаб изменения теплофизических характеристик материалов и веществ при  $900 \text{ К} < T_p < 1300 \text{ К}$  превышает аналогичный показатель в диапазоне изменения температур  $1300 < T_p < 1500 \text{ К}$ . Однако при увеличении  $T_p$  возрастает энергетический запас источника нагрева. В таких условиях прогрев СТТ реализуется быстрее и уменьшается влияние этой стадии, а соответственно и зависимости теплофизических характеристик от температуры на  $t_d$ .

В таблице приведены значения времени задержки зажигания в зависимости от начальной температуры стальной частицы при учете структурной неоднородности СТТ (для варианта  $\lambda=f(T)$ ,  $C=f(T)$ ) в сравнении с результатами решения задачи для случая постоянных теплофизических характеристик веществ и материалов.

Таблица

**Времена задержки зажигания в системе «смесевое твердое топливо – источник ограниченного теплосодержания – воздух» при  $\lambda=f(T)$ ,  $C=f(T)$**

$T_p$ , К	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900	800
$t_d^*$ , с	0,074	0,111	0,173	0,278	0,467	0,822	1,538	нет зажигания
$t_d^{**}$ , с	0,066	0,098	0,151	0,241	0,401	0,699	1,295	нет зажигания
$\varepsilon$ , %	11,4	12,1	12,7	13,4	14,1	14,9	15,8	–

$t_d^*$  – время задержки зажигания при постоянных значениях теплофизических характеристик материалов и веществ, с;  $t_d^{**}$  – время задержки зажигания с учетом зависимости теплофизических характеристик от температуры, с

Отклонения значений времен задержки зажигания с учетом зависимостей теплофизических характеристик веществ и материалов от температуры по сравнению с вариантом  $\lambda=\text{const}$ ,  $C=\text{const}$  составляет 15,8 % при  $T_p=900$  К и 11,4 % при  $T_p=1500$  К.

Определенные значения  $\varepsilon$  объясняются изменением теплофизических характеристик в достаточно широком диапазоне варьирования температур в системе «смесевое твердое топливо – источник ограниченного теплосодержания – воздух» в течение индукционного периода.

На рис. 3 приведено температурное поле в момент зажигания ( $t_d=0,338$  с) при  $T_p=1300$  К. Графическая иллюстрация (рис. 3) показывает, что зона локализации ведущей экзотермической реакции расположена в непосредственной близости от границы контакта металлизированного СТТ с «горячей» стальной частицей в районе оси симметрии. Также видно, что максимальные градиенты температур на нижней границе контакта источника зажигания с топливом характерны для участков  $0 < x < x_1$ ,  $x_2 < x < x_3$  и т.д. (см. рис. 1), соответствующих «связке» горючего и окислителя. Минимальные градиенты характерны для участков  $x_1 < x < x_2$ ,  $x_3 < x < x_4$  (см. рис. 1), соответствующих расположению частиц алюминия в приповерхностном слое СТТ. Данный результат обусловлен тем, что хотя через частицу алюминия тепло отводится вглубь КВ значительно быстрее, чем через «связку» горючего и окислителя, в зоне «связки» теплопроводность вещества низкая и температура приповерхностного слоя КВ растет достаточно интенсивно. При дальнейшем смещении в направлении роста  $x$  снижается температура вещества в зоне контакта с источником нагрева за счет дополнительного теплоотвода от боковой поверхности «горячей» частицы.

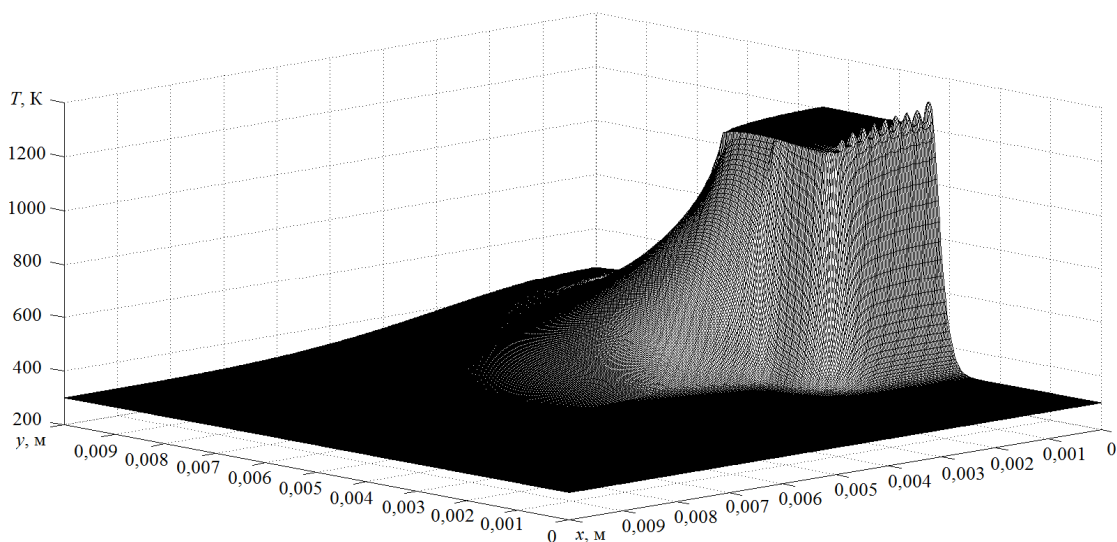


Рис. 3. Температурное поле системы «смесевое твердое топливо – источник ограниченного теплосодержания – воздух» в момент зажигания ( $t_d=0,338$  с) при  $T_p=1300$  К

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате численного исследования процесса зажигания металлизированного смесового твердого топлива разогретой до высоких температур частицей установлено, что при учете зависимости теплофизических характеристик материалов и веществ от температуры максимальное отклонение значений времен задержки зажигания в сравнении с результатами решения задачи для случая постоянных теплофизических характеристик составляет 15,8 % при  $T_p=900$  К (при изменении начальной температуры источника зажигания в диапазоне  $900 \text{ К} < T_p < 1500 \text{ К}$ ).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ «Разработка научных основ общей теории зажигания твердых, жидких и гелеобразных конденсированных веществ при локальном нагреве» на 2012–2013 гг. (грант № 12-08-33002) и частичной финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (соглашение № 8175).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vilyunov V.N., Zarko V.E. Ignition of solids. Amsterdam : Elsevier Science Publishers, 1989. 442 p.
2. Цуцуран В.И., Петрухин Н.В., Гусев С.А. Военно-технический анализ состояния и перспективы развития ракетных топлив. М. : МО РФ, 1999. 332 с.
3. 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.
4. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The influence of heat transfer conditions at the hot particle–liquid fuel interface on the ignition characteristics // Journal of Engineering Thermophysics. 2009. V. 18, № 2. P. 162-167.
5. Стрижак П.А. Численный анализ влияния выгорания жидкого топлива на характеристики его зажигания источником ограниченной энергоемкости // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19, № 12. С. 4-8.
6. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Таратушкина Г.В. Численное моделирование воспламенения конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 1. С. 78-85.
7. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Таратушкина Г.В. Моделирование зажигания конденсированных веществ «горячей» частицей // Химическая физика. 2004. Т. 23, № 5. С. 62-67.
8. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания слоя лесных горючих материалов нагретой до высоких температур частицей // Пожаровзрывобезопасность. 2006. Т. 15, № 16. С. 42-46.
9. Прокофьев В.Г., Писклов А.В., Смоляков В.К. Влияние теплопроводящего элемента на безгазовое горение образцов цилиндрической формы в неадиабатических условиях // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 47, № 1. С. 66-71.
10. Чумаков Ю.А., Князева А.Г. Иницирование реакции в окрестности одиночной частицы, нагреваемой СВЧ-излучением // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48, № 2. С. 24-30.
11. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное моделирование твердофазного зажигания металлизированного конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Химическая физика. 2011. Т. 30, № 12. С. 35-41.
12. Глушков Д.О., Стрижак П.А. Конвективный теплоперенос при зажигании полимерного материала локальным источником нагрева // Бултеровские сообщения. 2012. Т. 29, № 1. С. 99-111.
13. Глушков Д.О., Стрижак П.А. Влияние формы локального источника энергии на условия зажигания структурно-неоднородного твердого конденсированного вещества // Химическая физика и мезоскопия. 2012. Т. 14, № 3. С. 334-340.
14. Стрижак П.А. Физико-химические аспекты газофазного зажигания жидких топлив источника нагрева малых размеров // Сб. трудов XV междунар. НПК «Современные техника и технологии». Томск : Изд-во ТПУ, 2009. С. 334-336.
15. Стрижак П.А. Численный анализ влияния выгорания жидкого топлива на характеристики его зажигания источником ограниченной энергоемкости // Пожаровзрывобезопасность. 2010. Т. 19, № 12. С. 4-8.
16. Буркина Р.С., Микова Е.А. Высокотемпературное зажигание реакционноспособного вещества горячей инертной частицей с конечным запасом тепла // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45, № 2. С. 40-47.
17. Захаревич А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Зажигание модельных смесевых топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 5. С. 54-57.
18. Кузнецов Г.В., Захаревич А.В., Максимов В.И. Зажигание дизельного топлива одиночной «горячей» металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17, № 4. С. 28-30.
19. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М. : Наука, 1987. 490 с.
20. Самарский А.А. Теория разностных схем. М. : Наука, 1983. 616 с.
21. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. М. : Наука, 1975. 227 с.
22. Теплотехнический справочник / под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. М. : Энергия, 1975. Т. 1. 743 с.
23. Теплотехнический справочник / под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. М. : Энергия, 1975. Т. 2. 896 с.
24. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М. : ООО «Старс», 2006. 720 с.

---

### MODELLING OF COMPOSITE PROPELLANT IGNITION BY THE LIMITED HEAT CONTENT SOURCE AT THE ACCOUNTING OF DEPENDENCE THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF MATERIALS AND SUBSTANCES FROM TEMPERATURE

Glushkov D.O., Kravchenko E.V., Strizhak P.A.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

**SUMMARY.** Mathematical modeling of ignition process of the typical metallized composite propellant by a widespread source of the limited heat content – the metal particle warmed up to high temperatures in the form of a parallelepiped of the small sizes is executed. Numerical researches are carried out within the model considering in an obvious form dependence of thermophysical characteristics of materials and substances from temperature, and also the structural inhomogeneity of composite propellant caused by inclusions of aluminum particles. The main integrated characteristics of ignition process are defined.

**KEYWORDS:** ignition, metallized composite propellant, local energy source, temperature, thermophysical characteristics.

---

*Глушков Дмитрий Олегович, кандидат физико-математических наук, ассистент ТПУ, Энергетический институт, тел. 8(3822) 563-386, e-mail: dmitriyog@tpu.ru*

*Кравченко Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент ТПУ, ЭИ, e-mail: kevatp@tpu.ru*

*Стрижак Павел Александрович, доктор физико-математических наук, профессор ТПУ, ЭИ, тел. 8(3822) 701-777, доп. 1910, e-mail: pavelspa@tpu.ru*