

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И МЕХАНИЗМОВ ЗАЖИГАНИЯ ГЕЛЕОБРАЗНЫХ И ЖИДКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ

Стрижак П.А.,<sup>1</sup>Глушков Д.О.,<sup>1</sup>Вершинина К.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия (634050, Томск, пр.Ленина,30), e-mail:pavelspa@tpu.ru

Проведены численные исследования процессов тепломассопереноса при зажигании типичных гелеобразных и жидких топлив локальным источником нагрева малых размеров – одиночной разогретой до высоких температур металлической частицей. Получены основные интегральные характеристики исследуемого процесса в рассматриваемых системах – времена задержки зажигания. Проведён сравнительный анализ предельных условий и реализуемых режимов зажигания гелеобразного и жидкого топлив. В результате проведённых численных исследований выявлены значительные различия расположения зоны локализации ведущей реакции окисления в рассматриваемых системах. Установлено, что при зажигании гелеобразного топлива значения времён задержки зажигания ниже по сравнению с жидким топливом. Выявлено, что, в отличие от жидкого топлива, зона ведущей реакции окисления продуктов испарения горючего формируется в малой окрестности поверхности контакта гелеобразного топлива с частицей.

Ключевые слова: тепломассоперенос, плавление, испарение, кристаллизация, окисление, зажигание, гелеобразное топливо, жидкое топливо, нагретая металлическая частица.

## NUMERICAL ANALYSIS OF INTEGRATED CHARACTERISTICS AND MECHANISMS OF IGNITION GEL-LIKE AND LIQUID CONDENSED SUBSTANCES

Strizhak P.A.,<sup>1</sup>Glushkov D.O.,<sup>1</sup>Vershinina K.J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University , Tomsk, Russia (634050, Tomsk, street Lenina, 30), e-mail:pavelspa@tpu.ru

Numerical investigations of heat and mass transfer processes at typical gel-like and liquid fuels ignition by small local heating source – single metal particle heated up to high temperatures have been conducted. The basic integral characteristics of studying process in these systems – ignition delay times have been received. A comparative analysis of limited conditions and translatable modes of gel-like and liquid fuel ignition have been conducted. The significant differences of the localization zone location of the leading oxidation reaction in the concerned systems have been determined as a result of conducted numerical investigations. It has been established that values of ignition delay times at gel-like fuel ignition are lower in comparison with liquid fuel. It has been determined that the zone of leading oxidation reaction of fuel materials evaporation products is formed in a small vicinity to surface of contact between gel-like fuel and particle as opposite to liquid fuel.

Key words: heat and mass transfer, melting, evaporation, crystallization, oxidation, ignition, gel-like fuels, liquid fuels, heated metal particle.

### Введение

Процессы инициирования жидких и гелеобразных топлив имеют широкое распространение в энергетических системах, авиационной и космической технике, баллистических и других специальных установках. Численным исследованиям макроскопических закономерностей зажигания таких топлив при локальном подводе энергии посвящено большое количество теоретических работ [2, 3, 5]. Положения общей теории зажигания конденсированных веществ в условиях локального нагрева создают предпосылки к созданию новых энергоэффективных технологий инициирования конденсированных веществ в технологических установках. Представляет интерес проведение сравнительного

анализа основных механизмов и закономерностей тепломассопереноса при зажигании жидких и гелеобразных топлив.

Целью настоящей работы является численное исследование макроскопических закономерностей взаимосвязанных процессов тепломассопереноса, фазовых переходов и химического реагирования при газофазном зажигании гелеобразного и жидкого конденсированного вещества типичным локальным источником ограниченной энергоемкости, разогретой до высоких температур металлической частицей малых размеров.

### Постановка задачи

При постановке задачи зажигания гелеобразного топлива считалось, что разогретая до высоких температур металлическая частица инерционно осаждается на его поверхность (рис. 1). Температура топлива близка к криогенной. Топливо содержит окислитель и горючее. При этом окислитель для придания желеобразного агрегатного состояния сгущен добавками солей и гидратов. Объемные доли горючего ( $\varphi$ ) и окислителя ( $1-\varphi$ ) в конденсированном веществе известны. За счет энергии частицы приповерхностный слой топлива прогревается. Ускоряются процессы плавления топлива, находящегося в начальный момент времени при криогенных температурах в твердом агрегатном состоянии. При достижении условий парообразования происходит испарение гелеобразной структуры «горючее – окислитель». Пары горючего и окислителя поступают в область, заполненную инертным газом. В малой окрестности частицы формируется парогазовая смесь, содержащая горючее, окислитель и инертный газ. При достижении достаточных для воспламенения температур и концентраций компонентов смеси происходит зажигание. Временной интервал с момента выпадения источника нагрева на поверхность топлива до выполнения условий зажигания представляет время задержки зажигания  $\tau_d$ .

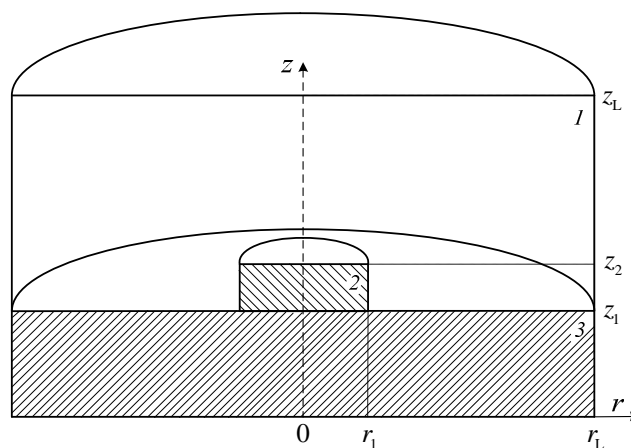


Рис. 1. Схема области решения задачи: 1 – парогазовая смесь, 2 – разогретая частица, 3 – топливо

Физическая постановка задачи зажигания жидкого конденсированного вещества (рис. 1) аналогична за исключением следующего: отсутствует фаза плавления топлива, окислитель находится в окружающей поверхность топлива воздухе, за счет большей плотности материала частицы по сравнению с жидким веществом происходит ее медленное погружение с формированием парового зазора.

Допущения, принятые при постановке задач, аналогичны [3, 5].

Критерии зажигания, используемые при постановке задачи тепломассопереноса (рис. 1), принимались согласно представлениям современной теории зажигания конденсированных веществ [8]: 1) энергия, выделяемая в результате химической реакции окисления горючего, больше теплоты, передаваемой от разогретой частицы топливу и формирующейся парогазовой смеси; 2) температура смеси газообразных компонентов окислителя и горючего в зоне реакции окисления превышает начальную температуру источника нагрева.

Для описания комплекса взаимосвязанных процессов тепломассопереноса в условиях химического реагирования, экзотермических и эндотермических фазовых переходов при зажигании гелеобразного топлива ( $0 < \tau < \tau_d$ ) использовалась следующая система нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений математической физики [5]:

для парогазовой смеси ( $r_1 < r < r_L$ ,  $z_1 < z < z_2$ ;  $0 < r < r_L$ ,  $z_2 < z < z_L$ ):

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} = \omega; \quad (1)$$

уравнение движения парогазовой смеси:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial r} + w \frac{\partial \omega}{\partial z} = v_1 \left[ \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right] + \beta g \frac{\partial T_1}{\partial z}; \quad (2)$$

уравнение энергии для парогазовой смеси:

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} + u \frac{\partial T_1}{\partial r} + w \frac{\partial T_1}{\partial z} = a_1 \left[ \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right] + \frac{Q_o W_o}{\rho_1 C_1}; \quad (3)$$

уравнение диффузии паров горючего:

$$\frac{\partial C_f}{\partial \tau} + u \frac{\partial C_f}{\partial r} + w \frac{\partial C_f}{\partial z} = D_{12} \left[ \frac{\partial^2 C_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_f}{\partial z^2} \right] - \frac{W_o}{\rho_2}; \quad (4)$$

уравнение диффузии паров окислителя:

$$\frac{\partial C_o}{\partial \tau} + u \frac{\partial C_o}{\partial r} + w \frac{\partial C_o}{\partial z} = D_{13} \left[ \frac{\partial^2 C_o}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_o}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_o}{\partial z^2} \right] - \frac{W_o}{\rho_3}; \quad (5)$$

уравнение баланса для парогазовой смеси:

$$C_f + C_o + C_g = 1; \quad (6)$$

уравнение теплопроводности для металлической частицы ( $0 < r < r_1, z_1 < z < z_2$ ):

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = a_2 \left[ \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right] + \frac{W_c Q_c}{z_L \rho_2 C_2}; \quad (6)$$

уравнение теплопроводности для топлива ( $0 < r < r_L, 0 < z < z_1$ ):

$$\frac{\partial T_3}{\partial \tau} = a_3 \left[ \frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right] - \frac{W_m Q_m}{z_L \rho_3 C_3}. \quad (7)$$

Начальные условия:  $T=T_0$  при  $0 < r < r_L, 0 < z < z_1$ ;  $T=T_p$  при  $0 < r < r_1, z_1 < z < z_2$ ;  $T=T_0, C_f=0, C_o=0, \psi=0, \omega=0$  при  $0 < r < r_L, 0 < z < z_1$ .

Граничные условия:  $r=0, r=r_L, 0 < z < z_1: \frac{\partial T_3}{\partial r} = 0$ ;  $r=0, z_1 < z < z_2: \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0$ ;  $r=r_1, z_1 < z < z_2:$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - q_r = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}; \quad r=0, r=r_L, z_2 < z < z_L: \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0; \quad z=0, 0 < r < r_L: \frac{\partial T_3}{\partial z} = 0; \quad z=z_1, 0 < r < r_1:$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} - Q_{ef} W_{ef} - Q_{eo} W_{eo} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}; \quad z=z_1, \quad r_1 < r < r_L: -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} - Q_{ef} W_{ef} - Q_{eo} W_{eo} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}; \quad z=z_2,$$

$$0 < r < r_1: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} - q_r = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}; \quad z=z_L, 0 < r < r_L: \frac{\partial T_1}{\partial z} = 0.$$

Здесь  $\tau$  – время, с;  $\tau_{d,c}$  – время задержки зажигания, с;  $r, z$  – координаты цилиндрической системы, м;  $r_L, z_L$  – размеры области решения, м;  $\psi$  – функция тока, м<sup>2</sup>/с;  $\omega$  – вихрь скорости, с<sup>-1</sup>;  $u, w$  – компоненты скорости газообразных продуктов испарения горючего и окислителя, м/с;  $\beta$  – коэффициент термического расширения, К<sup>-1</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $T$  – температура, К;  $T_0$  – начальная температура топлива и инертного газа, К;  $T_c$  – температура кристаллизации материала частицы, К;  $T_m$  – температура плавления топлива, К;  $T_p, K$  – начальная температура частицы, К;  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $Q_o$  – тепловой эффект реакции окисления паров горючего, Дж/кг;  $W_o$  – массовая скорость окисления, кг/(м<sup>3</sup>с);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $C_f$  – безразмерная концентрация паров горючего;  $C_g$  – безразмерная концентрация инертного газа;  $C_o$  – безразмерная концентрация паров окислителя;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $W_c$  – массовая скорость кристаллизации материала частицы, кг/(м<sup>2</sup>с);  $Q_c$  – тепловой эффект кристаллизации материала частицы, Дж/кг;  $W_m$  – массовая скорость плавления связки «горючее – окислитель», кг/(м<sup>2</sup>с);  $Q_m$  – тепловой эффект плавления системы «горючее – окислитель», Дж/кг;  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(мК);  $Q_{ef}$  – тепловой эффект испарения горючего, Дж/кг;  $Q_{eo}$  – тепловой эффект испарения окислителя, Дж/кг;  $W_{ef}$  – массовая скорость испарения горючего, кг/(м<sup>2</sup>с);  $W_{eo}$  – массовая скорость испарения окислителя,

кг/(м<sup>2</sup>с); индексы: 0 – начальный момент времени; 1 – парогазовая смесь; 2 – частица; 3 – топливо; 12 – пары горючего; 13 – пары окислителя.

Математическая постановка задачи зажигания жидкого конденсированного вещества представлена в [3].

Для решения системы нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных (1)–(7), а также системы уравнений, описывающей процессы тепломассопереноса при зажигании жидкого топлива, с соответствующими начальными и граничными условиями применен метод конечных разностей. Локально-одномерный метод и метод переменных направлений использованы для решения разностных аналогов дифференциальных уравнений по схеме, разработанной для решения задач сопряженной естественной и смешанной конвекции. Метод итераций применен для решения одномерных нелинейных уравнений. Система одномерных разностных уравнений решена методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы. Для повышения точности решения устанавливалось не менее 400 узлов разностной сетки по каждой из координат и использовался неравномерный шаг по времени  $10^{-9} \div 10^{-6}$  с.

Для оценки достоверности результатов численного моделирования выполнялась проверка консервативности используемых разностных схем (аналогично [3, 5] оценивалась погрешность по балансу энергии в расчетной области).

### **Результаты исследования и обсуждение**

Численные исследования процесса зажигания в рассматриваемых системах (рис. 1) выполнены при следующих значениях параметров [1, 6, 7]: начальная температура гелеобразного топлива и окружающего инертного газа  $T_0=90$  К; начальные температуры жидкого топлива и воздуха  $T_0=300$  К; начальная температура стальной частицы  $T_p$ , К=1200÷1700 К; параметры химического реагирования паров гидразина и сжиженного кислорода (тепловой эффект  $Q_0=14.644$  МДж/кг, энергия активации 121.3 кДж/моль, предэкспонент  $k_0=2.25 \cdot 10^9 \text{с}^{-1}$ ); тепловой эффект плавления топлива  $Q_m=395$  кДж/кг; температура плавления топлива  $T_m=274$  К; тепловой эффект испарения гидразина  $Q_{ef}=1390$  кДж/кг; тепловой эффект испарения сжиженного кислорода  $Q_{eo}=2100$  кДж/кг; параметры химического реагирования паров керосина с кислородом воздуха (тепловой эффект  $Q_0=42$  МДж/кг; энергия активации  $E=193$  кДж/моль, предэкспонент  $k_0=9 \cdot 10^8 \text{с}^{-1}$ ); тепловой эффект испарения керосина  $Q_e=25$  кДж/кг; температура кристаллизации материала стальной частицы  $T_c=1500$  К; тепловой эффект кристаллизации  $Q_c=205$  кДж/кг; размеры частицы при зажигании гелеобразного топлива  $R_p=Z_p=0.5 \div 5$  мм; размер частицы при зажигании жидкого топлива  $R_p=Z_p=0,15$  мм; толщина пленки топлива  $Z_c=5$  мм; размеры области решения

$r_L=z_L=20$  мм. Теплофизические характеристики взаимодействующих веществ принимались согласно [1, 6, 7].

Выполненные численные исследования процессов тепломассопереноса, фазовых переходов и химического реагирования при зажигании типичной гелеобразной топливной композиции «гидразин – сжиженный кислород» разогретой стальной частицей в рассматриваемой системе (рис. 1) позволили установить ряд макроскопических закономерностей.

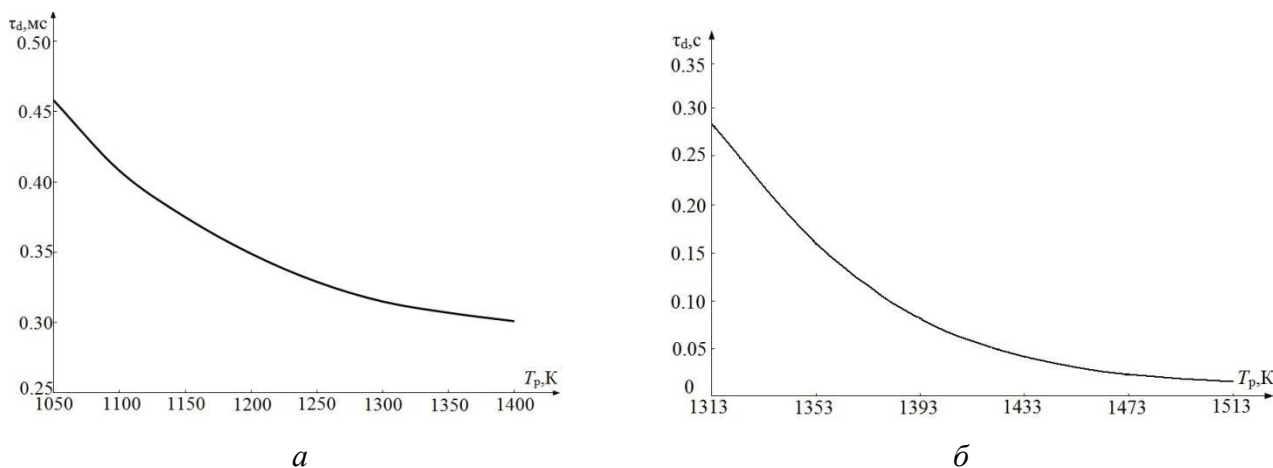


Рис. 2. Зависимость времени задержки зажигания от температуры металлической частицы  $T_p$ : для гелеобразного топлива при  $R_p=Z_p=3$  мм,  $Z_c=5.5$  мм(*a*); для жидкого топлива при  $R_p=Z_p=0.15$ (*б*)

В частности, установлено, что предельные значения параметров, определяющих теплосодержание частицы (температура, размеры), при которых возможно зажигание гелеобразного топлива (рис. 2, *a*), существенно превышают аналогичные параметры для систем жидкими конденсированными веществами (рис. 2, *б*). Так, например, для рассматриваемого топлива «гидразин – сжиженный кислород» минимальные значения температуры стальной частицы, при которой происходит зажигание, составляют 1050 К при  $R_p=Z_p=3$  мм (рис. 2, *a*). Вследствие специфики эндотермических фазовых переходов (плавление и испарение), протекающих в приповерхностном слое гелеобразного топлива, меньше энергии, аккумулированной в частице, сохраняется для прогрева смеси продуктов парообразования окислителя и горючего. При температурах менее 1000 К источники нагрева достаточно интенсивно остывают, а реакция окисления соответственно не ускоряется. Для типичных жидких топлив (керосин) условия зажигания при идентичных внешних условиях реализуются и при  $T_p=950$  К [2, 4, 9].

Также установлено, что в отличие от жидких топлив при нагреве приповерхностного слоя гелеобразного конденсированного вещества источником ограниченной энергоемкости зона ведущей реакции окисления формируется в малой окрестности основания частицы и

границы вдува продуктов парообразования. Это также обусловлено значительным расходом энергии источника нагрева на эндотермические фазовые переходы (плавление, испарение). Рост температуры парогазовой смеси вблизи основания частицы (рис. 3, *a*) можно объяснить тепловыделением при ускорении реакции окисления.

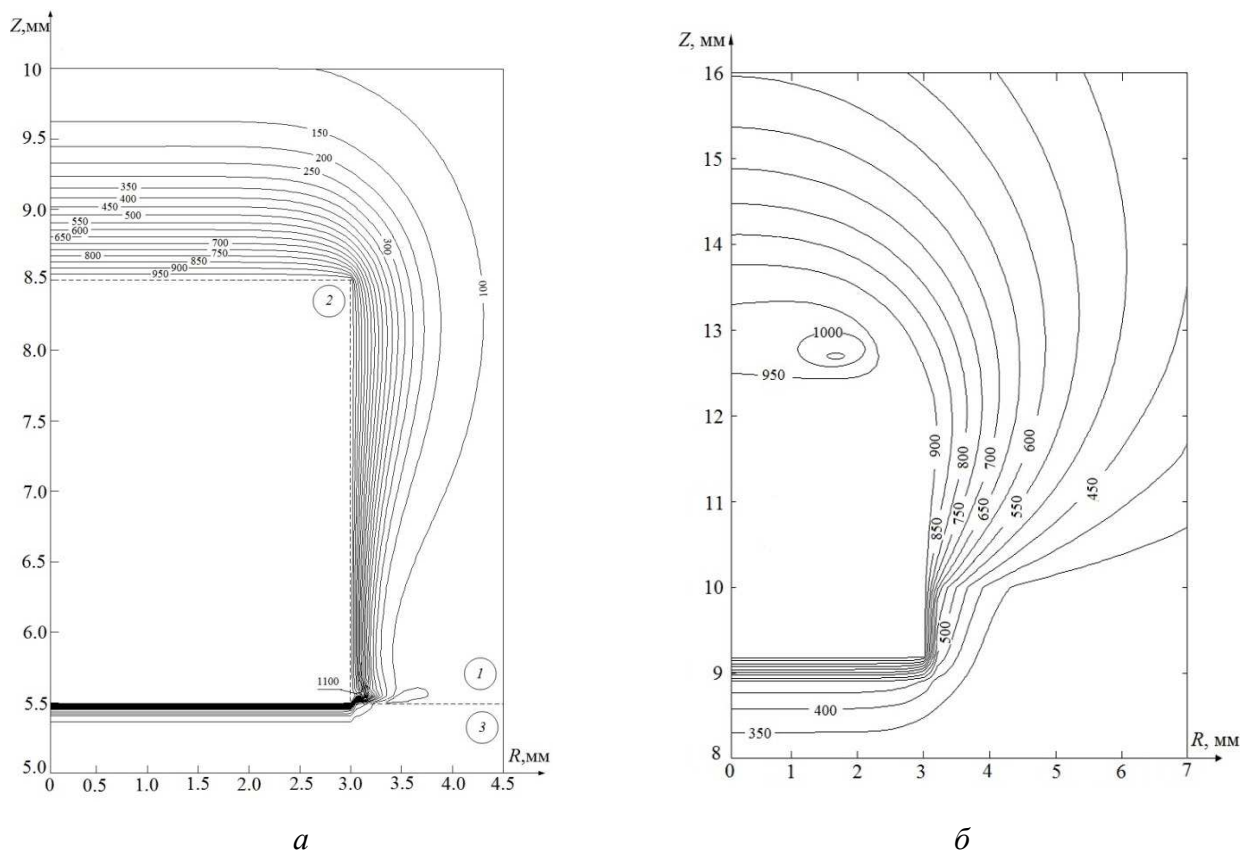


Рис. 3. Изотермы в момент воспламенения: гелеобразного топлива ( $\tau_d=0.46$  мс) при  $T_p=1050$  К,  $R_p=Z_p=3$  мм (*a*); жидкого топлива ( $\tau_d=0.915$  мс) при  $T_p=1000$  К,  $R_p=Z_p=3$  мм (*б*)

Выявлено, что при зажигании керосина зона воспламенения может располагаться в газовой области над частицей (первый режим (рис. 3, *б*)), вблизи боковой грани частично погруженного в топливо источника нагрева (второй режим), в паровом зазоре между частицей и жидкостью (третий режим) [3]. Установлено, что ни при каких условиях зажигание не происходит в паровом зазоре под частицей. Выявленная закономерность, очевидно, обусловлена недостаточным содержанием в этой области окислителя и существенным поглощением энергии фазового перехода при испарении жидкого горючего вещества.

### Выводы

1. Установлено, что при зажигании гелеобразного топлива одиночной нагретой частицей малых размеров значения времён задержки зажигания ниже по сравнению с жидким

топливом. При этом предельные значения основных параметров (температура, размеры) источника ограниченной энергоемкости выше.

2. Зона ведущей реакции окисления продуктов испарения горючего формируется в малой окрестности поверхности контакта гелеобразного топлива с частицей. Варьирование значений основных параметров источника нагрева – температуры и размеров – не приводит к изменению положения зоны реакции окисления в отличие от жидких топлив, при зажигании которых выявлены три режима зажигания с различной локализацией зоны воспламенения.

### Список литературы

1. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: ООО “Старс”, 2006. – 720 с.
2. Захаревич А.В., Стрижак П.А. Пожарная опасность взаимодействия источников ограниченного теплосодержания с легковоспламеняющимися жидкостями // Пожарная безопасность. – 2011. - № 4. – С. 70–75.
3. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Анализ возможных причин макроскопических различий характеристик зажигания жидкого топлива локальным источником энергии и массивным нагретым телом // Химическая физика. – 2012. – Т. 31. - №. 7.– С. 41–55.
4. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Газофазное зажигание пленки жидкого конденсированного вещества нагретой до высоких температур металлической частицей в условиях смешанной конвекции // Инженерно-физический журнал. – 2009. – Т. 82. - № 6. – С. 1052–1058.
5. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование процессов тепломассопереноса при зажигании гелеобразного топлива источником ограниченной энергоемкости // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86. - № 3. – С. 652–660.
6. Юренев В.Н., Лебедев П.Д. Теплотехнический справочник. – М: Энергия, 1975. – Т. 1. – 743 с.
7. Юренев В.Н., Лебедев П.Д. Теплотехнический справочник. – М: Энергия, 1975. – Т. 2. – 896 с.
8. Vilyunov V.N., Zarko V.E. Ignition of solids. – Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989. – 442 p.
9. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – V. 53, no. 5–6. – P. 923–930.

**Рецензенты:**



Ханефт А.В., д.ф-м.н., профессор, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово.

Мамонтов Г.Я., д.ф-м.н., профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск.