УДК 536.468

ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ ГЕЛЕОБРАЗНЫХ И СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ ЛОКАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Глушков Д.О., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-33002).

АННОТАЦИЯ

Выполнены численные и экспериментальные исследования интегральных характеристик процессов зажигания гелеобразных и металлизированных смесевых твердых топлив типичными источниками ограниченной энергоемкости – одиночными нагретыми до высоких температур металлическими и неметаллическими частицами малых размеров. Проведен анализ влияния теплосодержания источника энергии на длительность индукционного периода.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы твердые и гелеобразные конденсированные вещества (КВ) получили широкое применение в качестве топлив для специальных и энергетических установок. Эти высокоэнергетические материалы отличаются фазовым состоянием, теплофизическими и кинетическими характеристиками, механизмами зажигания и горения.

Достаточно актуальной является задача зажигания КВ при локальном нагреве источником ограниченного теплосодержания. С одной стороны такой способ инициирования горения является наиболее перспективным для повышения энергоэффективности процесса, с другой стороны взаимодействие высокоэнергетических материалов с «горячими» частицами, образующимися в результате резки, сварки, трения и т.д. характеризуется высокой пожарной опасностью.

В работах авторов [1–3] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов зажигания большой группы твердых и жидких конденсированных веществ (топлив, легковоспламеняющихся веществ, полимерных и лесных горючих материалов), парогазовых смесей, а также гетерогенных структур при локальном нагреве. Рассмотрены процессы инициирования возгораний при взаимодействии конденсированных веществ с разогретыми до высоких температур металлическими и неметаллическими частицами, проволочками, концентрированными потоками излучения и лазерами.

Представляет интерес анализ условий зажигания такими источниками нагрева смесевых и гелеобразных топливных композиций с целью исследования условий локального прогрева приповерхностного слоя топлив, реализации фазовых переходов, процессов тепломассопереноса в газовой фазе, ускорения экзотермических реакций, предшествующих устойчивому воспламенению и последующему горению.

Целью данной работы является численное и экспериментальное исследование макроскопических закономерностей зажигания гелеобразных и металлизированных смесевых твердых топлив одиночными нагретыми до высоких температур частицами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математическое моделирование физико-химических процессов, протекающих при зажигании высокоэнергетических материалов, проводилось на примере системы «одиночная частица – конденсированное вещество – газ», условная схема которой приведена на рис.1.

При моделировании гетерогенной структуры металлизированного КВ учитывалась реальная неоднородная структура вещества, обусловленная частицами алюминия. При этом в области решения выделялись участки, соответствующие частицам металла, а также смеси веществ, способных к экзотермическому реагированию (например, бутилкаучук и перхлорат аммония). При моделировании зажигания гелеобразного КВ предполагалось, что оно имеет гомогенную структуру, представляющую собой смесь окислителя (сжиженный кислород), горючего (гидразин), солей и гидратов при температуре близкой к криогенной. В качестве источников зажигания рассматривались одиночные частицы в форме дисков малых размеров.

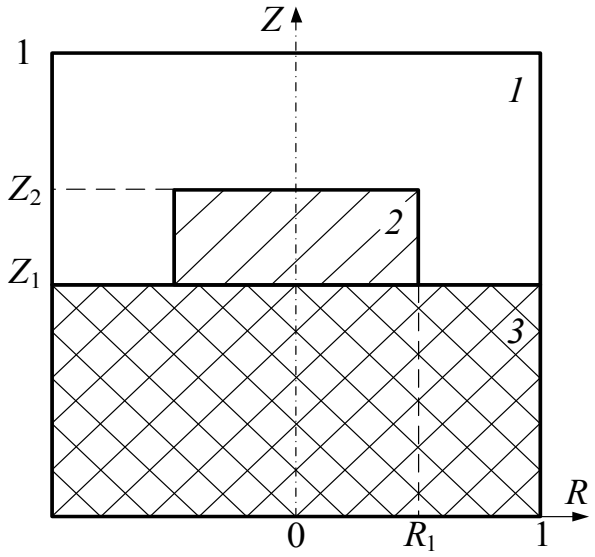

Рис.1 Схема области решения задачи зажигания: 1 – газ, 2 – «горячая» частица, 3 – конденсированное вещество.

При исследовании зажигания гелеобразного топлива предполагалось, что локальный источник энергии инерционно осаждается на поверхность КВ. За счет тепла «горячей» частицы приповерхностный слой топлива прогревается. Ускоряются процессы плавления вещества, 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. При достижении достаточных для воспламенения температур и концентраций компонентов смеси происходит зажигание.

При исследовании процессов зажигания металлизированного смесевого твердого топлива предполагалась реализация твердофазного механизма зажигания (процесс газификации КВ в течение индукционного периода не учитывался).

Для металлических (сталь, алюминий) частиц – источников энергии при постановке задачи учитывался фазовый переход в материале – кристаллизация расплавов металла. Считалось, что форма таких частиц в течение достаточно малого по времени индукционного периода практически не меняется. Характерные времена растекания источника зажигания в расплавленном состоянии существенно превышают максимально возможные значения времен задержки зажигания топлива.

Приняты следующие условия зажигания:

1. Теплоприход за счет экзотермической реакции превышает теплоотвод от источника нагрева в КВ и газовую область.

2. Температура в зоне локализации ведущей реакции окисления превышает начальную температуру «горячей» частицы.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Математические модели для систем «одиночная частица – металлизированное смесевое топливо – газ» [4], «одиночная частица – гелеобразное топливо – газ» [5] построены на базе системы нелинейных дифференциальных уравнений математической физики для описания процессов переноса энергии, количества движения и массы паров горючего вещества, химического реагирования, прогрева воспламеняемого вещества и последующих фазовых переходов.

Система диффиренциальных уравнений в частных производных решалась методом конечных разностей. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решались локально-одномерным методом. Метод итераций и метод прогонки применялись для решения одномерных разностных уравнений. Достоверность полученных результатов определялась проверкой консервативности разностной схемы, а также сравнением с результатами экспериментальных исследований.

© Глушков Д.О., Стрижак П.А.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проведены на установке (рис. 2) при использовании оборудования современной измерительной PIV-системы и нагревательной печи, описанной в [1].

Основными элементами экспериментальной установки являются персональный компьютер *1*, синхронизирующий процессор *2*, двойной импульсный твердотельный лазер *3–5*, кросскорреляционная видеокамера *7*, аналого-цифровой преобразователь *10*, термоэлектрический термопреобразователь *11*, нагревательная печь *13*.

Эксперименты проводились с частицей *12* в форме диска фиксированных размеров (l_p=2.5×10^{-3} м, h_p=2×10^{-3} м). «Горячая» частица падала на поверхность образца топлива размерами l=0.025 м, h=0.015 м. Температура частицы (T_p) существенно превышала начальную температуру топлива. «Горячая» частица при падении на поверхность топлива находилась в твёрдом состоянии и не деформировалась, так как скорость удара частицы о поверхность экспериментального образца не превышала 1.5 м/с. Форма приповерхностного слоя КВ после осаждения на его поверхность «горячей» частицы так же не менялась. Эксперименты проводились в хорошо воспроизводимых условиях.

Разогрев металлической частицы *12* до заданной температуры происходил в нагревательной печи *13*, обеспечивающей стабильную температуру рабочего объёма (до 1573 К) в течение продолжительного времени. Измерение начальной температуры частиц T_p осуществлялось методом термопарных измерений. В качестве первичного измерительного преобразователя использовался хромель-алюмелевый термоэлектрический термопреобразователь *11*. Для регистрации температуры на персональном компьютере *1* унифицированный сигнал проходил через аналого-цифровой преобразователь *10*. При проведении предварительных экспериментов было установлено, что рассеяние результатов увеличивается с уменьшением T_p. Поэтому число опытов (не менее 6) при фиксированном значении T_p и прочих одинаковых условиях выбиралось с учетом этой особенности.

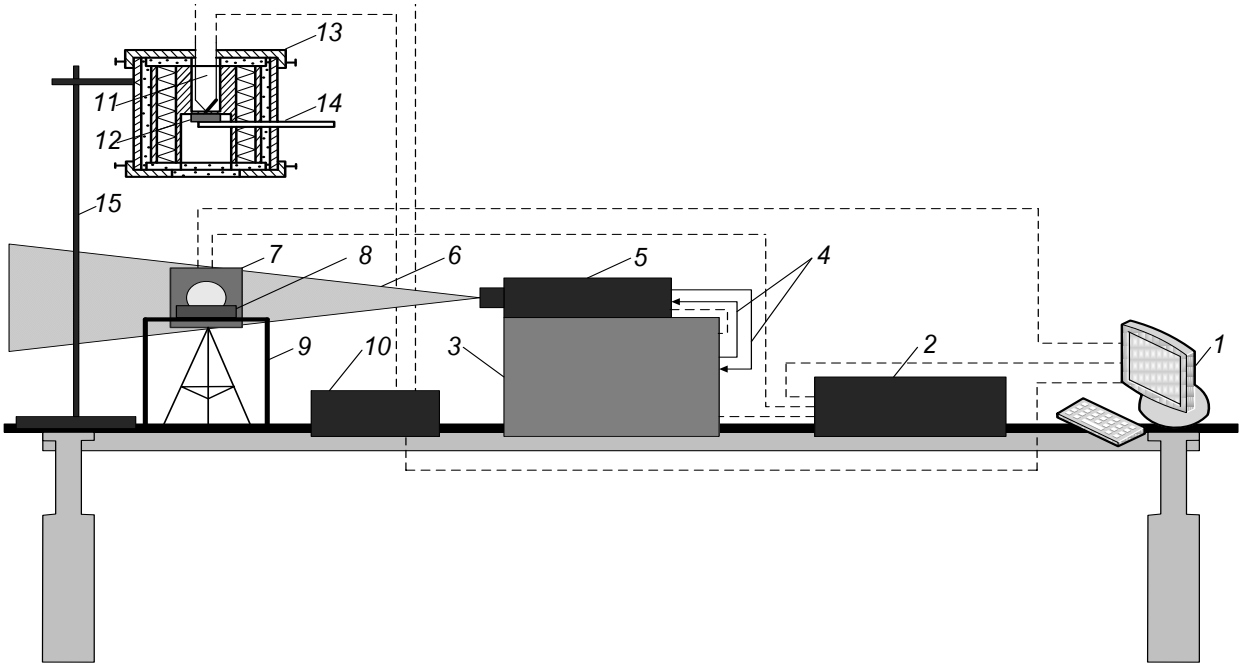

Рис.2 Схема экспериментальной установки: 1 – персональный компьютер; 2 – синхронизатор персонального компьютера, кросскорреляционной камеры и лазера; 3 – генератор лазерного излучения; 4 – канал движения охлаждающей жидкости лазера; 5 – двойной твердотельный импульсный лазер; 6 – световой «нож»; 7 – кросскорреляционная камера; 8 – образец топлива; 9 – огнестойкая площадка; 10 – аналого-цифровой преобразователь; 11 – термоэлектрический термопреобразователь; 12 – металлическая частица; 13 – нагревательный прибор; 14 – керамический стержень; 15 – штатив.

Систематическая погрешность измерения температуры источника нагрева не превышала 1÷2 %. Установлено, что за время падения температура поверхности контакта частицы с топливом уменьшается не более чем на 3÷4 К. Таким образом погрешность определения температуры равна ±0.5 %. Этим отклонением при анализе можно пренебречь, так как в экспериментах температура частицы составляла более 900 К.

Измерение и регистрация основной интегральной характеристики процесса – времени задержки зажигания t_d происходило автоматически. Период времени от момента соприкосновения «горячей» частицы с поверхностью КВ до появления видимого пламени фиксировался путем визуальных наблюдений и видеосъемки при помощи высокочастотной кросскорреляционной видеокамеры *7*. Видеосъемка и последующая обработка результатов при помощи специализированного программного обеспечения обеспечивала возможность детализации исследуемых механизмов и выделения достаточно тонких эффектов при многократном повторном анализе видеокадров.

Случайная ошибка определения времени задержки зажигания вычислялась по результатам проведенных экспериментов. Для каждой серии опытов при фиксированном значении T_p определялись средние значения t_d и среднеквадратические отклонения S. Значения S для каждой T_p отличались одно от другого и составляли от ±0.01 с до ±0.17 с. Соответствующие коэффициенты вариации изменялись от ±4.5 % до ±15 %. Полученные среднеквадратические отклонения и коэффициенты вариации можно считать приемлемыми для проведенных экспериментов в связи со сложностью механизма реализации изучаемого процесса. Систематическая погрешность измерения времени составляла ±0.005 %. и определялась возможностями персонального компьютера.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для обоснования принятой физической модели твердофазного зажигания металлизированного смесевого топлива проведены экспериментальные исследования. В качестве иллюстрации ниже приведен кадр видеограммы (рис. 3) в момент зажигания модельного состава топлива одиночной нагретой до высоких температур (Θ_p=1.125) стальной частицей в форме диска размерами R_p=0.3, Z_p=0.2. На рабочую область накладывалась сетка для фиксации возможного изменения положения источника нагрева за счет выделяющихся газов.

Установлено, что частица до момента появления пламени не изменяет своего положения относительно поверхности КВ (не отрывается от поверхности топлива). Если бы газообразные продукты разложения металлизированного смесевого топлива интенсивно выделялись под частицей при нагреве топлива, последняя смещалась бы относительно своего исходного (в начальный момент времени) положения.

Ни в одном из многочисленных опытов такого смещения до появления пламени не зарегистрировано. Интенсивная газификация горючего связующего наблюдалась лишь после резкого ускорения экзотермической реакции в приповерхностном слое топлива, когда горение принимало стационарный характер.

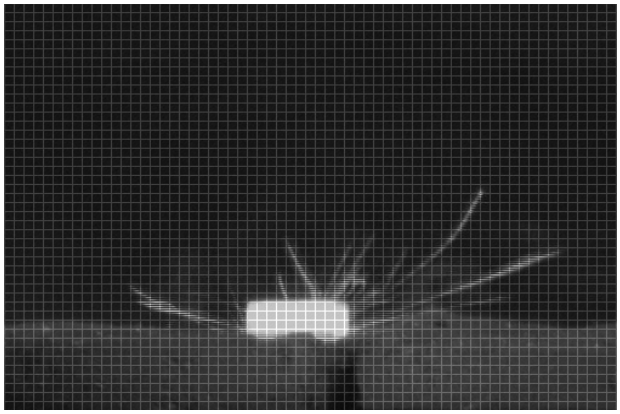

Рис.3 Кадр видеограммы опыта в момент зажигания металлизированного смесевого топлива горячей частицей τ=0.2 при R_p=0.3, Z_p=0.2, Θ_p=1.125.

В результате выполненных численных исследований установлены зависимости времен задержки зажигания (τ_d) металлизированного смесевого топлива от начальной температуры источника ограниченного теплосодержания при $0.875 \le \Theta_p \le 1.75$ (рис. 4). Нижняя граница диапазона изменения Θ_p соответствует минимальной начальной температуре «горячей»

стальной частицы (размерами R_p=0.2, Z_p=0.2), при которой в рассматриваемой системе (рис. 1) происходит воспламенение.

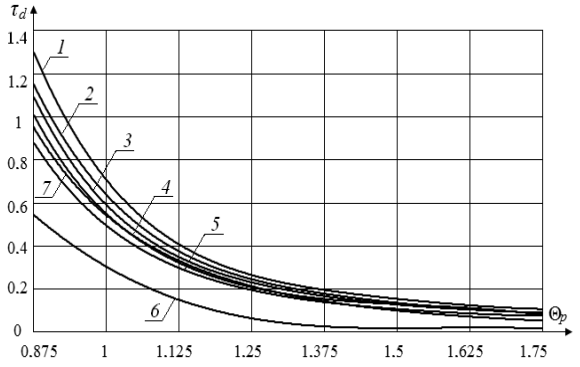

Рис.4 Времена задержки зажигания в зависимости от начальной температуры источника энергии: *1* – конвективный теплоотвод (при усреднении теплофизических характеристик топлива); *2* – конвективный теплоотвод (при учете структурной неоднородности топлива, Z_p=0.5R_p); *3* – конвективный теплоотвод (при учете структурной неоднородности топлива, Z_p=R_p); *4* – конвективный теплоотвод (при учете структурной неоднородности топлива, Z_p=1.5R_p); *5* – кондуктивный теплоотвод (при учете структурной неоднородности топлива); *6* – нагрев топлива массивной «горячей» пластиной (при учете структурной неоднородности топлива); *7* – экспериментальная кривая.

Наибольшие значения τ_d характерны для модели конвективного теплоплоотвода при замене неоднородной структуры металлизированного топлива однородной средой с эффективными теплофизическими характеристиками (кривая 1 на рис. 4). Также для модели конвективного теплоплоотвода установлено (кривая 3 на рис. 4), что при учете неоднородной структуры металлизированного топлива времена задержки зажигания меньше аналогичных показателей для гомогенной структуры вещества с усредненными теплофизическими характеристиками (кривая 1 на рис. 4).

Полученные результаты численных исследований (кривые 1 и 3 на рис. 4) качественно хорошо соответствуют результатам экспериментов (кривая 7 на рис. 4). При изменении начальной температуры «горячей» частицы в диапазоне 0.875≤Θ_p≤1.75 минимальное отклонение значений τ_d, вычисленных при помощи модели с эффективными теплофизическими характеристиками, относительно экспериментальных данных составляет 19.5 %. Аналогичное максимальное отклонение для модели, учитывающей неоднородную структуру металлизированного топлива, составляет 12.9 %.

Также установлено, что при увеличении характерного размера локального источника энергии вдоль оси Z (Z_p=0.5R_p – кривая 2, Z_p=R_p – кривая 3, Z_p=1.5R_p – кривая 4 на рис. 4) снижается (на 12 %) длительность индукционного периода. Полученную зависимость τ_d от размера частицы можно объяснить тем, что при его увеличении возрастает запас тепла источника зажигания. Как следствие, «горячая» частица остывает медленнее.

Учет влияния конвективных воздушных потоков во внешней среде проявляется в интенсификации процессов переноса тепла в рассматриваемой системе (рис. 1). Это приводит к росту скорости теплоотвода с поверхности источника зажигания. Как следствие, уменьшается количество теплоты, передаваемой от «горячей» стальной частицы в зону максимальных температур КВ на оси симметрии (R=0), где выполняются условия зажигания. Последнее приводит к увеличению длительности стадии прогрева топлива (кривые 3, 5 на рис. 4) в общем комплексе процессов теплопереноса в малой окрестности источника нагрева.

Тепловой поток за счет свободно-конвективного теплоотвода во внешнюю среду снижается с ростом теплосодержания локального источника энергии. Например, при увеличении Θ_p возрастает количество энергии, передаваемой «горячей» частицей топливу. В таких условиях изменение скоростей движения воздуха не оказывает значительного влияния на изменение плотности теплового потока в зону экзотермической реакции. Например, разность значений времен задержки зажигания для моделей конвективного и кондуктивного теплоотвода (кривая 3, 5 на рис. 4 соответственно) при 1.25≤Θ_p≤1.75 не превышает 14 % при прочих равных условиях.

Для гелеобразного топлива также получены зависимости $\tau_d=f(\Theta_p)$, иллюстрирующие (рис. 5) влияния начальной температуры источника нагрева Θ_p на время задержки зажигания τ_d. Можно отметить существенно меньшие значения времен задержки зажигания гелеобразной топливной композиции «гидразин – сжиженный кислород» по сравнению с типичными твердыми топливами. Однако при этом минимальные температуры частиц ($\Theta_p\approx1.1$), при которых реализуются условия зажигания, выше, чем приведены [1–3]. Полученные пороговые значения начальных температур $\Theta_p\approx1.1$ можно объяснить существенным влиянием эндотермических фазовых переходов (плавление и испарение) на условия теплоотвода от источника нагрева в рассматриваемой системе (рис. 1).

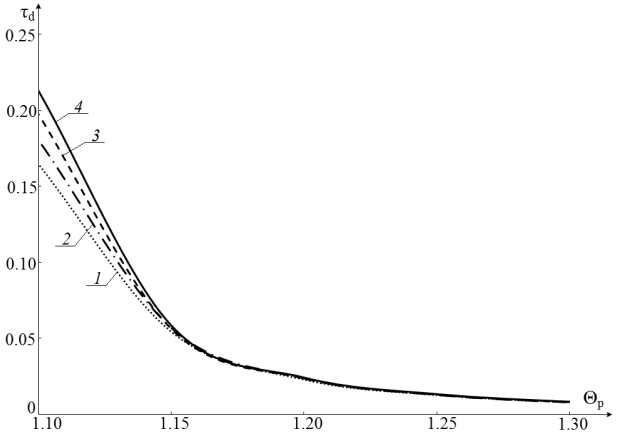

Рис.5 Зависимость времени задержки зажигания гелеобразной топливной композиции от температуры одиночных разогретых частиц из различного материала при $R_d=Z_d=0.15$: *1* – сталь, *2* – алюминий, *3* – керамика, *4* – углерод.

Температура системы «гидразин – сжиженный кислород» в исходном состоянии близка к криогенной $\Theta_0=0.09$. При прогреве приповерхностного слоя топлива за счет энергии частицы в очень тонком слое реализуются условия плавления. Тепловой эффект рассматриваемого фазового перехода в системе «гидразин – сжиженный кислород» составляет $Q_m=3.95\cdot10^5$ Дж/кг. Это приводит к заметному снижению температуры частицы вблизи границы фазового перехода относительно Θ_p и снижению глубины прогрева топлива. При достижении температур, достаточных для испарения окислителя и горючего происходит парообразование. Эти эндотермические фазовые переходы характеризуются значениями теплоты парообразования, существенно превышающими ($Q_e\approx(1.4\div2)\cdot10^6$ Дж/кг) теплоту плавления Q_m. Поэтому падение температуры частицы на границе с топливом становится еще более значительным относительно начальной Θ_p. Глубина прогрева топлива при этом увеличивается несущественно. Как следствие меньше энергии, аккумулированной в частице, сохраняется для прогрева смеси продуктов парообразования окислителя и горючего. Установлено, что при $\Theta_p<1$ рассмотренные металлические и углеродистые частицы достаточно интенсивно остывают, а реакция окисления продуктов парообразования соответственно не ускоряется.

Установленные отклонения времен τ_d для системы «гидразин – сжиженный кислород» при нагревании металлическими (сталь, алюминий) и неметаллическими (керамика, углерод) частицами малых размеров (рис. 5) показывают, что с понижением температуры локального источника энергии влияние его теплосодержания усиливается.

При $\Theta_p=1.1$ и $R_d=Z_d=0.15$: $Q_p=0.315$ кДж – сталь; $Q_p=0.208$ кДж – алюминий; $Q_p=0.302$ кДж – керамика; $Q_p=0.161$ кДж – углерод.

Рис. 5 показывает, что имеется некоторое предельное значение Q_p, при превышении которого материал источника нагрева из рассматриваемых комбинаций несущественно влияет на инерционность зажигания. Так, например, можно выделить значение $Q_p\approx0.35$ кДж при $\Theta_p=1.2$.

Максимальным значением теплоты Q_p, аккумулированной стальной частицей, можно объяснить минимальные времена задержки зажигания топлива τ_d (рис. 5). Наибольшие времена τ_d характерны углеродистой частице с минимальным значением Q_p. Несмотря на большее теплосодержание керамической частицы по сравнению с алюминиевой времена задержки зажигания для последней меньше. Это можно объяснить существенным превышением теплопроводности алюминия по сравнению с керамическими материалами (алюминий – λ=98 Вт/(мК), керамика – λ=20 Вт/(мК)), а также поступлением в зону реакции дополнительной энергии в результате экзотермического перехода при кристаллизации расплава металла. Приповерхностный слой топлива прогревается быстрее при нагревании алюминиевой частицей, которая вследствие

больших значений λ интенсивно остывает. Температура керамической частицы изменяется несущественно (в пределах 3 %) относительно начальной Θ_p даже при относительно больших временах задержки зажигания ($\tau_d \approx 0.2$). Температура алюминиевой частицы на границе контакта с топливом при $\tau_d \approx 0.2$ уменьшается относительно начальной на 7 %.

ВЫВОДЫ

В результате численных и экспериментальных исследований процессов зажигания гелеобразных и металлизированных смесевых твердых топлив установлены:

- Основные закономерности физико-химических процессов.
- Влияния параметров источников энергии (начальная температура, размеры), внешних параметров (температура, влажность и скорость воздуха), процессов (испарение, кристаллизация, радиационный теплообмен) на условия и характеристики зажигания.
- Оптимальные (по времени зажигания) и предельные (по температуре источника) условия воспламенения.
- Характерные механизмы и режимы зажигания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zakharevich A.V.. Ignition of model composite propellants by a single particle heated to high temperatures / A.V. Zakharevich, G.V. Kuznetsov, V.I. Maksimov, V.T. Kuznetsov // Combustion, explosion, and shock waves. – 2008. – Vol.44, no.5. – pp.543-546.
2. Kuznetsov G.V. On the scale of «simultaneous» influence of several «hot» particles on the conditions of heat and mass transfer at ignition of liquid condensed substance / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Journal of engineering thermophysics. – 2009. – Vol.18, no.4. – pp.263-270.
3. Кузнецов Г.В. Математическое моделирование зажигания слоя лесных горючих материалов нагретой до высоких температур частицей / Г.В. Кузнецов, Н.В. Барановский // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т.15, №4. – С.42-46. Kuznetsov G.V. and Baranovskiy N.V. (2006). “Mathematical modeling of ignition of forest combustible materials layer by particle heated to high temperatures”, *Pozharovzryvobezopasnost*, Vol.15, no.4, pp.42-46.
4. Glushkov D.O. Numerical simulation of solid phase ignition of metallized condensed matter by a particle heated to a high temperature / D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Russian journal of physical chemistry B. – 2011. – Vol.5, no.6. – pp.1000-1006.
5. Kuznetsov G.V. Computational investigation of heat and mass transfer processes in a gel-like fuel ignited by a limited-capacity source/ G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Journal of engineering physics and thermophysics. – 2013. – Vol.86, no.3. – pp.695-704.