

ЗАЖИГАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ОДИНОЧНОЙ, НАГРЕТОЙ ДО ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ЧАСТИЦЕЙ

А. В. Захаревич¹, В. Т. Кузнецов², Г. В. Кузнецов¹, В. И. Максимов¹

¹Томский политехнический университет, 634034 Томск, elf@tpu.ru

²Томский государственный университет, 634034 Томск

Излагаются методика и результаты экспериментального исследования закономерностей зажигания конденсированных веществ (модельных топливных композиций) «горячей» одиночной частицей металла. Исследована зависимость времени задержки зажигания конденсированных веществ (КВ) от начальной температуры частицы. Приведены результаты исследований и анализ механизма взаимодействия одиночной, нагретой до высоких температур частицы с неметаллизированным и металлизированным КВ. Установлено, что наличие металлического наполнителя в КВ приводит к изменению абсолютных значений времени задержки зажигания и относительных характеристик их разброса.

Ключевые слова: конденсированное вещество, время задержки зажигания, нагретая до высоких температур частица.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что возможный механизм зажигания конденсированного вещества (КВ) одиночными, нагретыми до высоких температур частицами известен достаточно давно [1], до настоящего времени отсутствуют экспериментальные данные об основных закономерностях этого процесса. Известные теоретические результаты [2, 3] получены с использованием математических моделей, базирующихся на допущении об идеальном контакте нагретой частицы с поверхностью КВ. Такое допущение обосновано только для однородных КВ (нитроклетчатка, порох и др.). Для гетерогенных композиций, имеющих в своем составе частицы окислителя и металла, такое допущение не может быть полностью обоснованным. Кроме того, представляет интерес анализ особенностей механизма зажигания КВ одиночными нагретыми частицами и его соответствие общей теории зажигания конденсированных веществ [4, 5]. Поэтому экспериментальное изучение закономерностей и механизма зажигания КВ «горячими» частицами является актуальной, не решенной до настоящего времени задачей.

Цель данной работы — экспериментальное исследование зависимости времени задержки зажигания модельных топливных компози-

ций от температуры одиночных частиц, являющихся источником зажигания.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения экспериментов с образцами КВ использовалась экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 1. Диаметр образца 40 мм. Составы исследованных образцов приведены в таблице.

В качестве источника зажигания использовался металлический диск диаметром $3 \div 6$ мм и толщиной 2 мм. Высота и диаметр диска выбирались таким образом, чтобы обеспечить его хороший контакт с поверхностью КВ. Положение слишком маленьких (и соответственно легких) частиц в момент контакта с КВ было неустойчивым.

Ранее в теоретических исследованиях [2, 3] было установлено, что при диаметре частицы (диска) — источника зажигания $d > 0.2$ мм

Модельные составы КВ	Компоненты	Содержание, %
№ 1	Перхлорат аммония	80
	Бутилкаучук	14
	Хиноловый эфир	6
№ 2	Перхлорат аммония	75
	Бутилкаучук	14
	АСД-4	5
	Хиноловый эфир	6

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-08-00366-а).

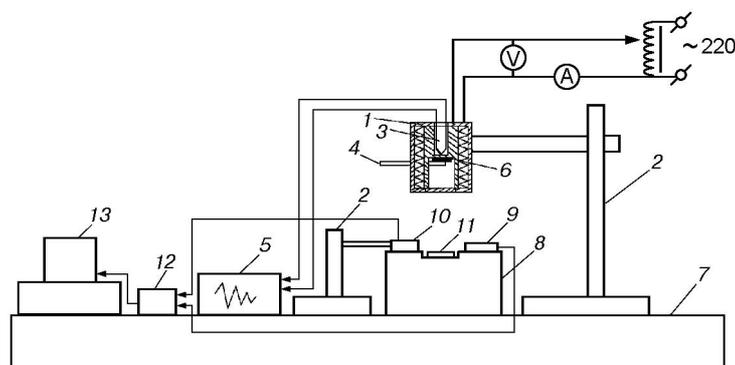


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 — нагревательный прибор, 2 — штатив, 3 — хромель-алюмелевая термопара, 4 — керамический стержень, 5 — электронный потенциометр КСП4, 6 — металлическая частица, 7 — рабочая поверхность экспериментальной установки, 8 — огнестойкая площадка, 9 — приемник излучения и регистратор пламени, 10 — излучатель, 11 — образец КВ, 12 — аналого-цифровой преобразователь, 13 — персональный компьютер

время задержки зажигания практически не зависит от значения d .

Металлическая частица при падении на поверхность экспериментального образца находилась в твердом состоянии и не деформировалась, так как скорость удара частицы о поверхность экспериментального образца не превышала 1.7 м/с. Форма образца после осаждения на его поверхность «горячей» частицы так-

же не менялась. Эксперименты проводились в хорошо воспроизводимых условиях. Нагрев металлического диска до заданной температуры осуществлялся в нагревательной печи (рис. 2), обеспечивающей стабильную температуру рабочего объема (до 1173 К) в течение продолжительного времени. Нагревательная печь представляла собой стальной цилиндр (диаметр 75 мм, высота 100 мм), отверстия которого закрывались теплоизолирующими крышками с целью минимизации теплотерь в окружающую среду. В стальном цилиндре находилась конструкция из жаростойкой стали Ст. 3. Она представляла собой полый цилиндр, со сквозными отверстиями на внутренней поверхности, в которые укладывался нагревательный элемент (спираль из нихрома). Для предотвращения короткого замыкания спираль изолировали бусинками из керамики. Между стенками внутренней стальной конструкции и внешней конструкцией из жаростойкой стали находился изолятор (шамот). Такая схема нагревательного прибора обеспечивала получение равномерной температуры металлической частицы. Значение температуры фиксировалось электронным потенциометром (см. 5 на рис. 1), первичным преобразователем которого являлась хромель-алюмелевая термопара. Нижняя часть термопары по оси стальной конструкции упиралась в стальную жаростойкую перегородку толщиной 1 мм, к которой снизу прижималась металлическая частица. Это позволяло достаточно точно измерять температуру «горячей» частицы. При достижении металлическим дис-

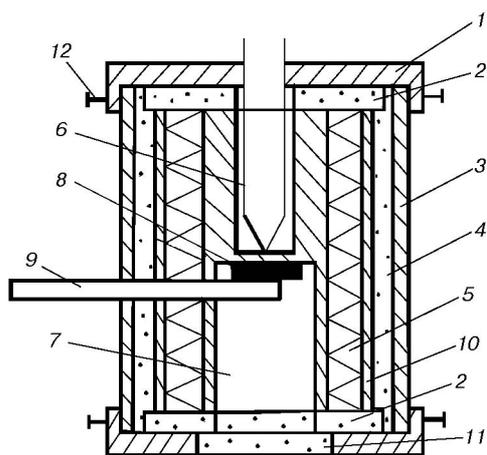


Рис. 2. Нагревательная печь:

1 — теплоизолирующая крышка (2 шт.), 2 — теплоизолятор (шамот), 3 — стальной цилиндр, 4 — прокладка из шамота, 5 — нихромовая спираль, 6 — хромель-алюмелевая термопара, 7 — отверстие для вывода частиц, 8 — стальная частица, 9 — держатель из керамики, 10 — конструкция из жаростойкой стали, 11 — цилиндрическая задвижка (шамот), 12 — винт

ком заданного значения температуры открывалась задвижка на нижней крышке нагревательного прибора и отодвигался керамический держатель, нагретая частица падала (с высоты 150 мм) на образец КВ. Момент соприкосновения «горячей» частицы с образцом КВ фиксировался регистратором, состоящим из излучателя и приемника излучения (см. 9, 10 на рис. 1). Падая, частица перекрывала тонкий световой луч между излучателем и приемником излучения. Через определенное время после соприкосновения «горячей» частицы с образцом происходило зажигание КВ, которое регистрировалось фотоэлементом. При появлении вспышки пламени фотоэлемент формировал сигнал, который через аналого-цифровой преобразователь фиксировался на компьютере. Время задержки зажигания определялось от момента падения частицы на поверхность КВ до момента появления пламени. Для увеличения достоверности измерений опыты проводились 6–8 раз подряд в идентичных условиях. Погрешность измерения начальной температуры частицы, оцениваемая по методике [6], не превышала $1 \div 3 \%$.

Проведена оценка изменения температуры частицы — источника зажигания КВ. Решена задача теплопроводности для частицы в форме диска. Рассматривался период времени падения частицы на поверхность КВ. Задача решалась при граничных условиях третьего рода на поверхности диска. Коэффициент теплообмена рассчитывался по зависимостям [7] с учетом изменения скорости движения частицы. Установлено, что за время падения частицы температура поверхности ее контакта с КВ уменьшается на 4°C . Этим отклонением при анализе можно пренебречь.

Период времени от момента соприкосновения частицы с КВ до зажигания контролировался путем визуальных наблюдений и видеосъемки. Установлено, что до зажигания не происходит интенсивной газификации КВ и колебаний частицы в вертикальном направлении. Можно сделать вывод, что в рассматриваемых условиях справедлива твердофазная модель зажигания конденсированного вещества.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлены полученные в экспериментах зависимости времени задержки зажигания τ_{ind} двух модельных составов (ме-

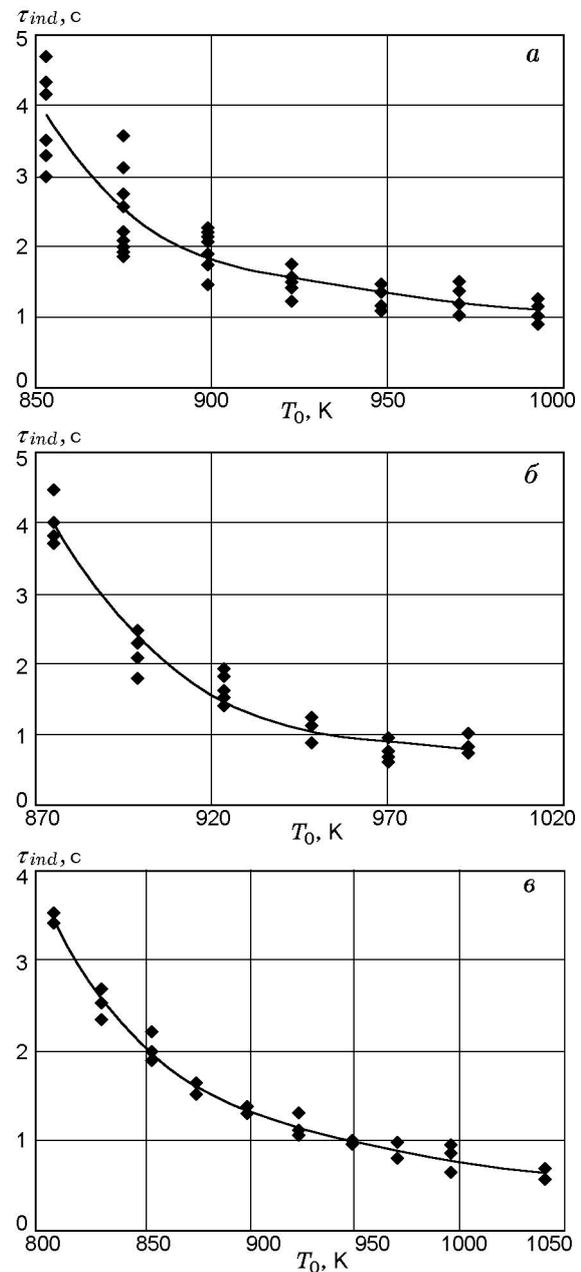


Рис. 3. Экспериментальная зависимость времени задержки зажигания металлизированного (а, б) и неметаллизированного (в) составов от температуры частицы (диаметр $d = 5$ (а), 3 (б), 6 мм (в); высота $h = 2$ мм)

таллизированного и неметаллизированного) от начальной температуры частицы T_0 . Аппроксимационные кривые получены методом наименьших квадратов. Левое предельное значение температуры на каждом рисунке соответствует минимальному значению T_0 , при ко-

тором еще наблюдалось зажигание КВ. При дальнейшем снижении T_0 зажигание модельных композиций не происходило. Сопоставление рис. 3, а, б позволяет сделать вывод о том, что изменение характерного поперечного размера частицы в диапазоне $d = 3 \div 5$ мм не приводит к заметному изменению значения τ_{ind} . Кроме того, установлено, что при относительно низких температурах частицы ($T \leq 923$ К) разброс экспериментальных данных для металлизированного КВ увеличивается с ростом размеров нагретых частиц.

Результаты экспериментов с топливной композицией, в которой отсутствовал металл, приведены на рис. 3, в. Хорошо видно, что отклонения значений τ_{ind} от средних величин для неметаллизированной композиции намного меньше, чем для металлизированной. Кроме того, сравнение рис. 3, а–в показывает, что введение Al в структуру КВ заметно увеличивает время задержки зажигания (на $20 \div 25$ %). Последнее, очевидно, обусловлено ростом эффективной теплопроводности композиции при прочих равных условиях. Соответственно этому металлизированная композиция поглощает больше теплоты и прогревается на большую глубину по сравнению с неметаллизированной.

Во всех проведенных экспериментах зарегистрировано устойчивое зажигание исследованных составов, т. е. не было случаев вспышки (локальной) с последующим затуханием. Этот результат позволяет сделать вывод, что одиночные, нагретые до высоких температур частицы металлов могут быть, как отмечалось еще в [1], устойчивыми источниками зажигания КВ. При этом зажигание происходит в достаточно большом ($7 \div 50$ %) диапазоне изменения значений τ_{ind} при полностью идентичных внешних условиях и происходит достаточно стабильно в рассмотренном диапазоне параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые получены экспериментальные данные о зависимости задержки зажигания

смесевых топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей металла от ее начальной температуры. Эти результаты не только подтверждают возможность реализации исследованного механизма зажигания на практике, но также являются определенной эмпирической базой для дальнейшего развития моделей зажигания как гомогенных, так и гетерогенных топлив. Важен также полученный на основе обобщения экспериментальных результатов вывод о стабильном характере зажигания топливных композиций одиночной «горячей» частицей в определенном диапазоне температур даже при наличии достаточно развитой шероховатости поверхности металлизированного топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мак-Алеви Р. Ф., Кауан П. Л., Саммерфилд М. Механизм воспламенения смесевых твердых топлив горячими газами // Исследование ракетных двигателей на твердом топливе: Сб. статей. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. С. 397–415.
2. Кузнецов Г. В., Мамонтов Г. Я., Таратушкина Г. В. Численное моделирование зажигания конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 1. С. 78–85.
3. Кузнецов Г. В., Мамонтов Г. Я., Таратушкина Г. В. Зажигание конденсированного вещества «горячей» частицей // Хим. физика. 2004. Т. 23, № 3. С. 67–72.
4. Виллюнов В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск, 1984.
5. Vilynov V. N., Zarko V. E. Ignition of Solids. Amsterdam; Oxford; New York; Tokyo: Elsevier Science Publ., 1989.
6. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
7. Исаченко В. П. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.

Поступила в редакцию 1/IX 2007 г.,
в окончательном варианте — 14/II 2008 г.