

ВЛИЯНИЕ ПОРОШКА ЖЕЛЕЗА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ СМЕСЕВЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

^{1,2}КОРОТКИХ А.Г., ¹АРХИПОВ В.А., ³ГЛОТОВ О.Г., ³КИСКИН А.Б., ³ЗАРКО В.Е.

¹Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

³Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

АННОТАЦИЯ. Исследовано влияние 2 масс. % добавки порошка железа в состав смесового твердого топлива, содержащего 15,7 масс. % нанопорошка алюминия Alex, на характеристики зажигания и горения топлив. Установлено, что частичная замена Alex на порошок железа в составе смесового твердого топлива приводит к снижению времени задержки зажигания в 1,3 – 1,9 раза в диапазоне плотности теплового потока 55–220 Вт/см² и увеличению реактивной силы оттока продуктов газификации от поверхности горения образца на 27 %. Степенной показатель закона скорости горения уменьшается с 0,51 до 0,43, линейная скорость горения увеличивается на 30 – 45 % и относительная масса к-фазы уменьшается с 0,25 до 0,19 в диапазоне давления азота в бомбе постоянного давления 2,0 – 7,5 МПа. При этом в конденсированных продуктах сгорания увеличивается содержание оксида алюминия α -Al₂O₃, нитрида алюминия AlN и нитрида углерода C₃N₄ за счет возможного увеличения градиента температуры и скорости химических реакций в газофазной зоне горения смесового твердого топлива.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: смесовое твердое топливо, порошок алюминия, добавка железа, время задержки зажигания, лазерное излучение, импульс реактивной силы, скорость горения, конденсированные продукты сгорания.

ВВЕДЕНИЕ

Современные смесовые твердотопливные системы содержат в качестве окислителя кристаллы перхлората и нитрата аммония, гексогена, октогена или CL-20, горючего-связующего – полимерные инертные или активные каучуки, содержащие энергетические функциональные группы (нитратные, нитраминные или нитрогруппы) и металлическое горючее – порошки металлов (в основном алюминия) разной дисперсности, максимальное содержание которых достигает 22 масс. % [1]. Регулирование скорости горения смесовых твердых топлив (СТТ) в камере сгорания и удельного импульса ракетного двигателя в основном достигается за счет введения в состав СТТ катализаторов горения (как правило, порошков оксидов металлов) [2 – 5] или путем частичной или полной замены перхлората (нитрата) аммония нитраминами, а также изменения коэффициента избытка окислителя и размеров частиц кристаллов окислителя и металлического горючего [6, 7]. Перспективными металлическими горючими являются смеси порошков алюминия различной дисперсности или смеси алюминия и нанопорошков (НП) других металлов или их сплавов. Ранее было установлено [8], что НП металлов, полученные по технологии электрического взрыва проводников, обладают высокой реакционной способностью в реакциях окисления и имеют ряд свойств, которые отличают их от микронных порошков: наличие оксидно-гидроксидного слоя и водорода на поверхности частиц, агломерированных частиц, образовавшихся в процессе производства, пассивации и хранения порошков, а также наличие внутренних пор в структуре агломерированных частиц и электростатического поля у поверхностного и приповерхностного слоев частицы.

Основными характеристиками зажигания и горения СТТ, позволяющими оценить их воспламеняемость, устойчивость переходного процесса от зажигания тепловым потоком к самоподдерживающему горению и энергетику в процессе горения в энергосиловых

установках, являются зависимости времени задержки зажигания твердых топлив от плотности теплового потока или температуры нагрева, линейной скорости горения топлива от давления окружающей среды, а также единичный импульс реактивной силы [9], равный приросту величины тяги, реализуемому при сгорании единицы массы топлива.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния добавки порошка железа на времена задержки газификации и зажигания, реактивную силу оттекающих от поверхности горения топлива продуктов газификации, температуру поверхности реакционного слоя в период зажигания СТТ CO_2 -лазером, а также на линейную скорость горения, количественный и фазовый состав конденсированных продуктов сгорания (КПС) исследуемых смесевых твердо топливных систем, содержащих НП алюминия Alex.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Исследуемые образцы СТТ

Для исследования основных характеристик зажигания и горения использовали два смесевых состава твердого топлива. Первый – базовый состав СТТ, содержащий 64,6 масс. % бидисперсный перхлорат аммония (ПХА) (фракции мельче 50 мкм и 160 – 315 мкм в соотношении 40/60); 19,7 масс. % бутадиеновый каучук марки СКДМ-80, пластифицированный трансформаторным маслом; 15,7 масс. % металлическое горючее – нанопорошок алюминия Alex, полученный в аргоне по технологии электрического взрыва проводников. Во втором смесевом составе твердого топлива НП Alex частично замещался на 2 масс. % каталитической добавки – НП железа. Исследуемые цилиндрические образцы СТТ диаметром 10 и высотой 30 мм изготавливали по технологии [10] в лабораторных условиях с помощью порционного перемешивания компонентов с последующим проходным прессованием. Плотность отвержденных образцов СТТ в зависимости от компонентного состава составляла 1,53 – 1,56 г/см³. Для проведения эксперимента выбирали одинаковые по плотности образцы СТТ.

В работе использовались порошки алюминия и железа, полученные по одинаковой технологии. Фотографии электронного растрового микроскопа Merlin частиц НП алюминия Alex с разным увеличением и функции массового распределения частиц по размерам, измеренные с помощью лазерного анализатора размера частиц Analysette 22 в дистиллированной воде с ультразвуком, используемых НП металлов, представлены на рис. 1 и 2.

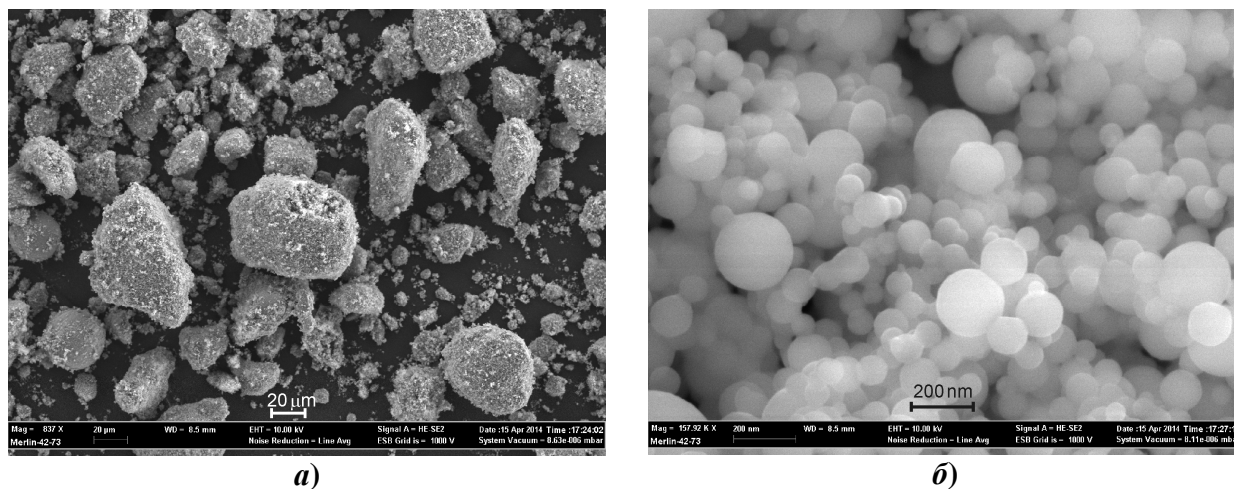
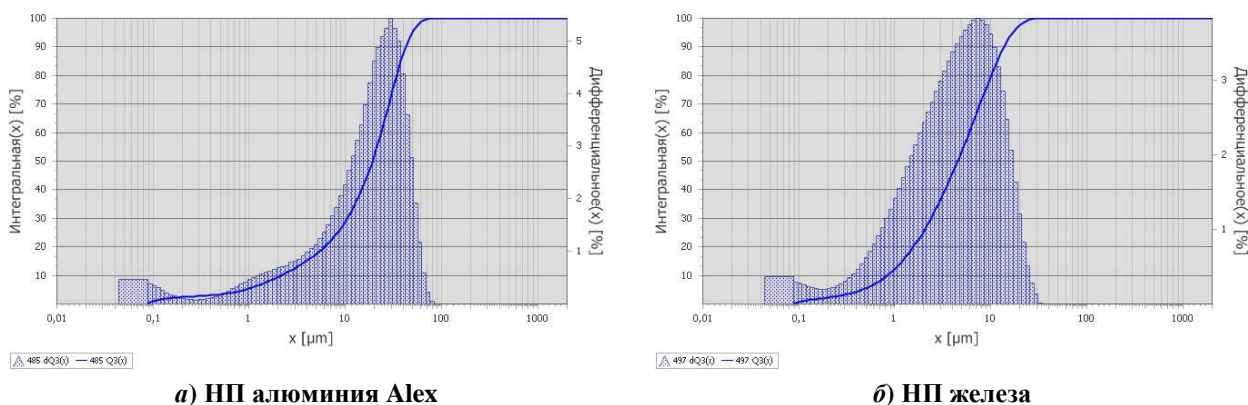


Рис. 1. Фотографии электронного растрового микроскопа агрегированных (а) и отдельных наноразмерных (б) частиц НП алюминия Alex



а) НП алюминия Alex

б) НП железа

Рис. 2. Функции массового распределения агломерированных частиц по размерам исходных НП алюминия Alex (а) и железа (б)

В практической работе с НП Alex обнаружилось, что в период длительного хранения (~2 года) в закрытой емкости при нормальных условиях происходит образование агломерированных пористых микроразмерных частиц, состоящих из наночастиц алюминия покрытых оксидно-гидроксидным слоем (процесс образования происходит без плавления алюминия). Согласно данным измерения на анализаторе размера частиц (рис. 2) среднемассовый диаметр агрегированных частиц НП Alex составляет $d_{43} = 21,0$ мкм, НП железа – $d_{43} = 6,1$ мкм, что на порядок больше, чем размер отдельных наночастиц (рис. 1, б). Отметим, что агломерированные пористые частицы НП металлов имеют большую удельную площадь поверхности и высокую реакционную способность по сравнению с микронными порошками [8]. Согласно измерениям на БЭТ-анализаторе Nova 2200e в азоте удельная площадь поверхности НП алюминия Alex составляет $7,04$ м²/г, НП железа – $1,08$ м²/г. Кроме того, НП алюминия, полученный по технологии электрического взрыва проводников в различных газовых средах, при хранении адсорбирует до 5 масс. % газов, в основном водорода [8]. В предыдущих работах [2, 5, 7] при изготовлении смесевых образцов твердого топлива с помощью специальной технологии получали равномерное распределение частиц НП алюминия Alex в матрице смесевых образцов. В работе [11] показано, что в процессе изготовления смесевых топливных композиций с применением НП металлов и растворов полимеров окончательное формирование структуры композиционных материалов сопровождается перестройкой и изменением дисперсного состава металлических агломерированных частиц.

1.2. Зажигание СТТ

Исследование процесса зажигания составов СТТ осуществлялось с использованием установки лучистого нагрева на основе CO₂-лазера непрерывного действия с длиной волны излучения 10,6 мкм и максимальной мощностью 100 Вт (рис. 3). Перед опытом образцы СТТ нарезались на таблетки высотой 5 мм. При этом торцевая поверхность образцов визуально контролировалась на отсутствие пор, углублений и трещин. Образцы СТТ помещались в эбонитовый полый цилиндр высотой 10 мм для бронирования боковой поверхности и создания одномерного течения продуктов газификации.

Исследуемый образец (6) СТТ крепился к подложке измерителя величины реактивной силы (8) оттекающих от поверхности горения продуктов газификации. При открытии затвора (4) излучение фокусировалось линзой (5) из хлорида натрия на исследуемый образец СТТ (6). Сигналы от измерителя величины реактивной силы (8), фотодиодов (7) передавались через АЦП сигналов L-card E-14-440 (9) и записывались в персональный компьютер (10), а затем обрабатывались с помощью программного приложения LGraph2. Время задержки начала газификации t_{gas} образца СТТ определяли по разности моментов изменения сигнала фотодиода (7) у затвора (или термодары, установленной перпендикулярно к оси лазерного луча после затвора) и измерителя величины реактивной силы (8). Фотодиод (7)

регистрировал момент открытия затвора (4), измеритель (8) регистрировал появление реактивной силы продуктов газификации оттекающих от торцевой (облучаемой) поверхности образца. Время задержки зажигания t_{ign} СТТ определяли по разности моментов времени изменения сигналов от фотодиодов (7), один из которых регистрировал появление пламени на торцевой поверхности образца. Относительная погрешность разброса данных времени задержки t_{gas} и t_{ign} составляла 5 – 12 % при величине доверительной вероятности 0,9. Мощность лазерного излучения, падающего на образец СТТ, измерялась с помощью термоэлектрического датчика (3). Определялось максимальное значение мощности излучения в центре лазерного луча.

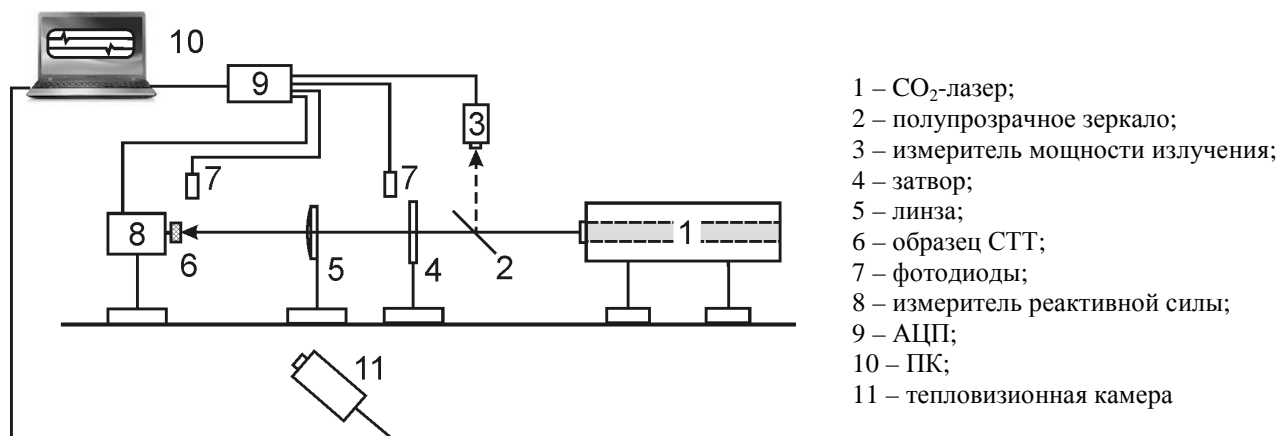


Рис. 3. Схема экспериментальной установки на основе CO_2 -лазера

Величина реактивной силы оттока продуктов газификации с торцевой поверхности образца в процессе прогрева реакционного слоя, зажигания и горения СТТ определялась с помощью измерителя реактивной силы [9]. Предварительно осуществлялась его градуировка в вертикальном положении с помощью грузов определенной массы.

Измерение температурного поля на поверхности реакционного слоя исследуемых образцов СТТ проводили с помощью тепловизионной камеры марки Jade J 530 SB в инфракрасной области спектра 2,5 – 2,7 мкм с цифровой записью на персональном компьютере. Коэффициент излучения торцевой поверхности образцов СТТ измерялся на шаровом фотометре и составлял ~ 0,9. При обработке значений температур в программном комплексе Altair на ПК коэффициент излучения образцов принимался постоянным в период прогрева реакционного слоя и появления пламени СТТ. Погрешность измерения температур на торцевой поверхности образца составляла не более 10 % при частоте кадров 50 Гц.

1.3. Горение СТТ

Исследование влияния добавки НП железа на процессы горения СТТ осуществлялось в азоте при варьируемых избыточных давлениях в проточной бомбе постоянного давления с отбором конденсированных продуктов сгорания (рис. 4).

Образцы СТТ имели форму цилиндра диаметром 10 мм и высотой 20 – 30 мм. Боковая поверхность образцов бронировалась термостойким каучуком «солпрен» (сополимер стирена и бутадиена). При сгорании бронировки образовывались углеродистые частицы, содержание которых в КПС не превышало 1 масс. %. К заднему торцу бронированного образца СТТ приклеивалась подложка из оргстекла. На передний торец образца наносилась воспламенительная паста.

Образец СТТ (10), размещенный на подложке (11) с обтекателем (12), крепился к верхней крышке (3) с помощью трех спиц (4) и вставлялся в тонкостенный внутренний цилиндр (5), который размещался внутри проточного корпуса бомбы (1). Во время опыта

бомба постоянного давления непрерывно продувалась азотом, поступающим из баллона высокого давления через впускной вентиль (16). Верхняя крышка (3) снабжена впускным клапаном, который состоял из резиновой прокладки (13) прижатой к фторопластовой шайбе (14) и крышке (3) с помощью центрального винта (15). В исходном положении резиновый диск (13) закрывал отверстия (2) верхней крышки (3). При продувке бомбы азотом край резинового диска (13) отгибался и впускал газ внутрь цилиндра (5). При поджигании образца СТТ (10) нихромовой проволокой (9) давление во внутреннем цилиндре (5) повышалось, и впускной клапан запирался за счет прижатия резинового диска (13) к отверстиям (2) верхней крышки (3). При горении образца (10) газообразные и конденсированные продукты сгорания СТТ проходили через пакет металлических ситовых сеток (6) и аналитический аэрозольный фильтр (7) типа АФА-ХА, которые улавливали твердые частицы разных размеров. Использовались ситовые сетки с номинальными размерами ячеек 900, 500, 315, 160 и 80 мкм.

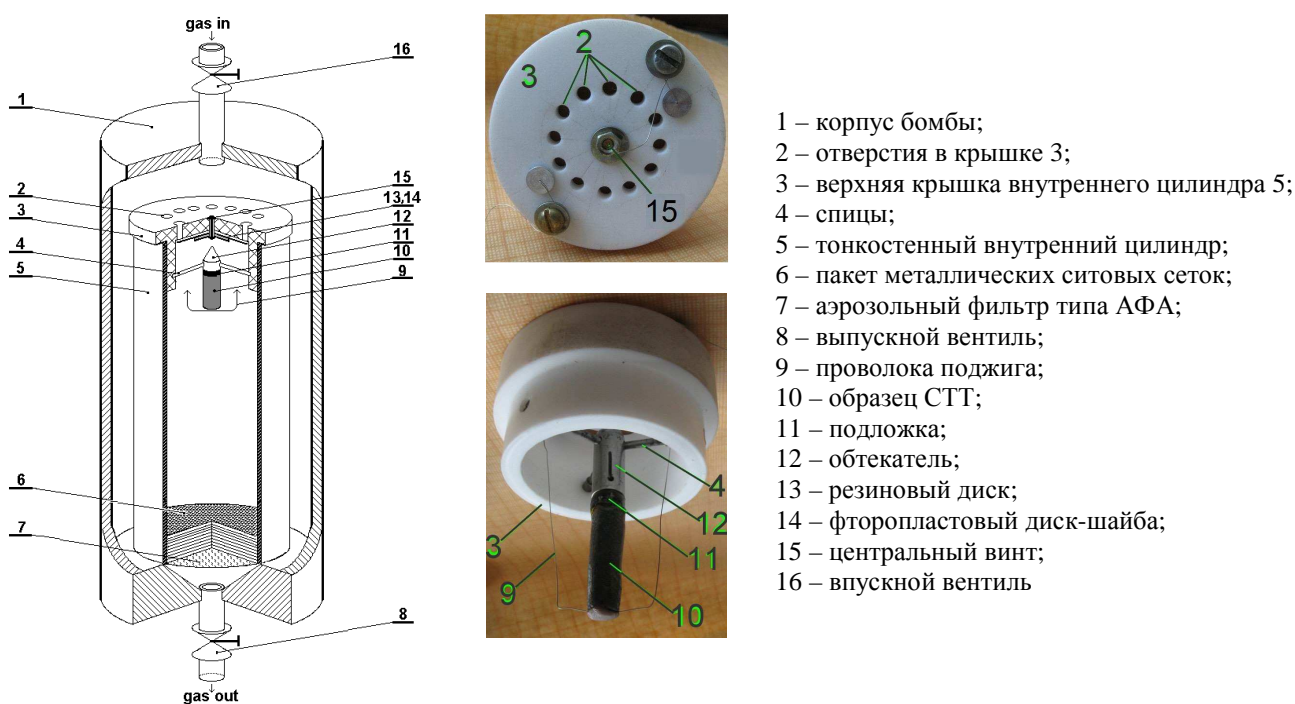


Рис. 4. Конструкция проточной бомбы постоянного давления с отбором конденсированных продуктов сгорания СТТ

Проточная бомба постоянного давления снабжена манометром и датчиком давления типа ЛХ-412. Требуемые давление и расход газа устанавливали с помощью впускного 16 и выпускного 8 вентилях. Расход газа контролировали на выходе из бомбы с помощью ротаметра и трубки Вентури с U-образным манометром.

По записи кривой давления на осциллографе определяли время горения образца и затем рассчитывали линейную скорость горения СТТ.

После сжигания образца СТТ аналитические фильтры высушивали в комнатных условиях в течение суток для испарения конденсата, затем отделяли верхний слой с конденсированными частицами, растворяли его в ацетоне и объединяли с суспензией частиц КПС, полученной в результате промывки ацетоном пакета металлических сит. Суспензию фракционировали на ситах с размерами ячеек 1000, 500, 315 и 160 мкм. Ситовые фракции частиц после сушки взвешивали на аналитических полумикровесах с погрешностью не более 0,1 мг и проводили визуальный осмотр частиц с помощью электронного микроскопа Jeol 6000 с целью выявления размера и типичных особенностей строения частиц. Затем ситовые фракции КПС для одинаковых образцов смешивали и проводили измерение массового распределения частиц по размерам на анализаторе размера частиц Analysette 22 и фазового состава КПС на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 6000.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Зажигание СТТ

Определены значения времени задержки газификации и зажигания, температуры поверхности реакционного слоя, величины реактивной силы исследуемых составов СТТ в воздухе при нормальных условиях с использованием установки лучистого нагрева на основе CO₂-лазера. Результаты измерения, полученные с помощью измерителя реактивной силы продуктов газификации, оттекающих от торцевой поверхности образцов СТТ (времена задержки газификации t_{gas} и воспламенения t_{ign} , величина реактивной силы продуктов газификации F), представлены на рис. 5. Зависимости времени задержки зажигания СТТ от плотности теплового потока излучения показаны на рис. 6.

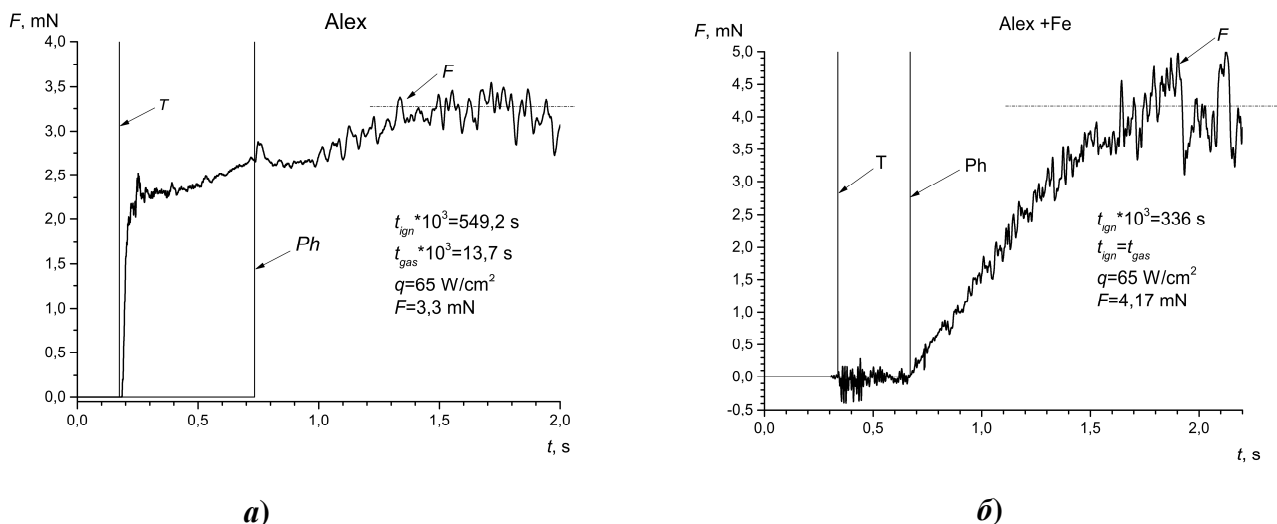


Рис. 5. Сигналы термомпары (T), фотодиода (Ph) и измерителя реактивной силы (F) оттока продуктов газификации в период зажигания и горения образцов СТТ с Alex (a) и Alex+Fe (b) при $q_{max} = 65 \text{ Вт/см}^2$

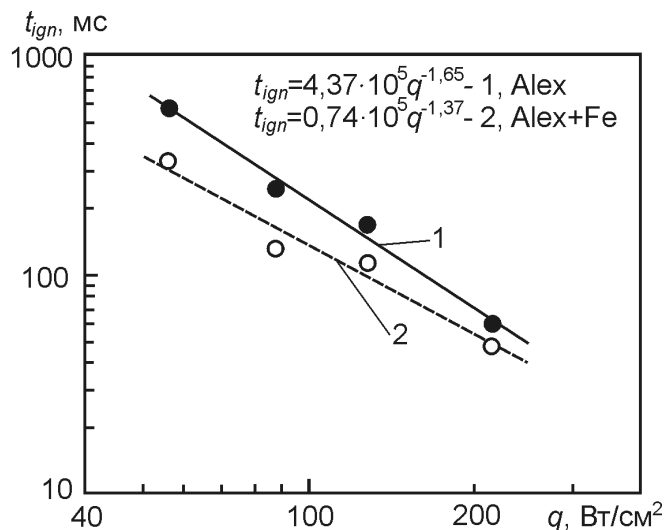


Рис. 6. Время задержки зажигания СТТ от плотности теплового потока излучения

Установлено, что частичная замена Alex на порошок железа в составе смесового твердого топлива приводит к снижению времени задержки зажигания в 1,3 – 1,9 раза в диапазоне плотности теплового потока 55 – 220 Вт/см². Для образца СТТ, содержащего Alex, время задержки газификации t_{gas} в 40 раз меньше, чем время задержки зажигания t_{ign} при максимальной плотности теплового лучистого потока в центре лазерного луча $q = 65 \text{ Вт/см}^2$.

Для образца СТТ, содержащего смесь НП Alex+Fe моменты времени начала газификации и зажигания совпадают. Частичная замена НП Alex на железо в составе СТТ приводит к увеличению времени задержки газификации в 25 раз и сокращению времени задержки зажигания в 1,6 раза, при этом реактивная сила оттока продуктов газификации с поверхности образца F увеличивается в 1,3 раза в период установившегося режима горения СТТ. В момент появления пламени осредненная по поверхности температура реакционного слоя образца T_{ig} увеличивается на 22 – 32 % в диапазоне плотности теплового потока излучения $q = 132 – 316 \text{ Вт/см}^2$ (табл. 1).

Таблица 1

Температура поверхности реакционного слоя СТТ в момент появления пламени

$q, \text{ Вт/см}^2$	Температура поверхности реакционного слоя $T_{ig}, \text{ }^\circ\text{C}$	
	Alex (образец 1)	Alex+Fe (образец 2)
132	590 ± 50	720 ± 70
316	720 ± 80	950 ± 110

2.2. Горение СТТ

Для оценки влияния добавки железа на энергетические характеристики СТТ и долю конденсированных веществ в продуктах сгорания, с использованием программы «ТЕРРА» проведены термодинамические расчеты равновесного состава продуктов сгорания исследуемых составов топлив, результаты которых представлены в табл. 2. Приведены значения энтальпии топлив I , адиабатической температуры горения T_{ad} , равновесного показателя адиабаты k , относительной молекулярной массы газообразных продуктов сгорания μ для давления в камере сгорания $p_k = 4 \text{ МПа}$, а также коэффициент избытка окислительных элементов α (рассчитывался для системы в целом). Для газодинамической степени расширения потока $p_k/p_a = 40:1$ (давление на срезе сопла $p_a = 0,1 \text{ МПа}$) приведены значения скорости истечения газов w , удельного импульса J и массовой доли к-фазы z .

Таблица 2

Результаты термодинамического расчета

Образец СТТ	Расчетные параметры								
	$I, \text{ кДж/кг}$	$T_{ad}, \text{ К}$	k	μ	α	$w, \text{ м/с}$	$J, \text{ м/с}$	z_k, z_a	состав КПС
1, Alex	-2228	2561	1,19	17,0	0,422	2299	2519	0,263 0,276	$\text{Al}_2\text{O}_3 - 100 \%$
2, Alex+Fe	-2179	2477	1,20	17,5	0,424	2244	2455	0,237 0,241	$\text{Al}_2\text{O}_3 - 100 \%$

Результаты термодинамического расчета показали, что добавка железа в количестве 2 масс. % в составе СТТ приводит к снижению температуры горения, скорости истечения газов, удельного импульса и массовой доли к-фазы при указанных давлениях в камере сгорания и на срезе сопла.

Для сравнения проведены экспериментальные исследования процесса горения СТТ в проточной бомбе постоянного давления с отбором конденсированных продуктов сгорания. Получены значения линейной скорости горения u исследуемых составов СТТ при разных значениях давления азота (рис. 7). В табл. 3 представлены значения скорости горения и относительной массы конденсированных продуктов сгорания образцов $m_{ссп}$, равной отношению массы $M_{ссп}$ КПС к начальной массе образца СТТ $M_{сатр}$ при давлении азота 3,9 МПа.

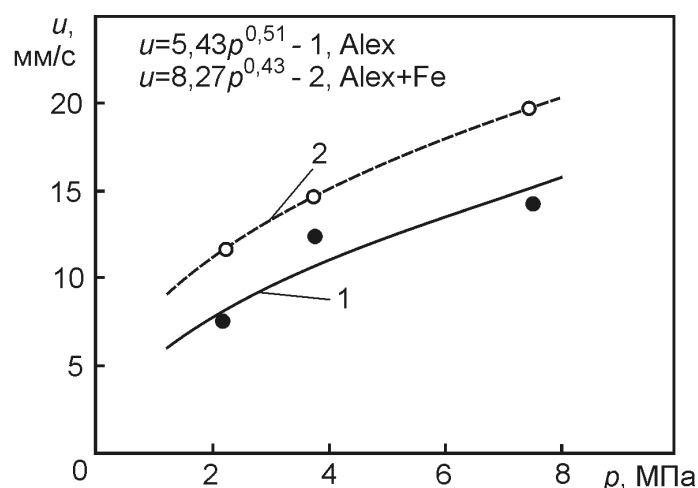


Рис. 7. Скорость горения СТТ в зависимости от давления

Таблица 3

Скорость горения и относительная масса конденсированных продуктов сгорания СТТ в азоте при давлении 3,9 МПа

Образец СТТ	u , мм/с	$m_{ссп} = M_{ссп}/M_{смп}$
1, Alex	$12,5 \pm 0,4$	$0,25 \pm 0,04$
2, Alex+Fe	$15,5 \pm 0,2$	$0,19 \pm 0,03$

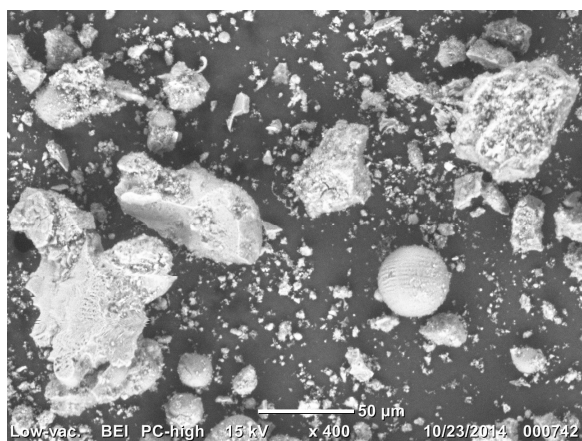
Установлено, что частичная замена НП алюминия Alex на порошок железа в составе СТТ приводит к уменьшению степенного показателя закона скорости горения с 0,51 до 0,43 и увеличению скорости горения с 7,5 до 11,7 мм/с при давлении 2,2 МПа и с 14,3 до 19,7 мм/с при давлении 7,5 МПа. При этом относительная масса конденсированных продуктов сгорания уменьшается с 0,25 до 0,19 при давлении 3,9 МПа.

2.3. Дисперсный и фазовый состав КПС

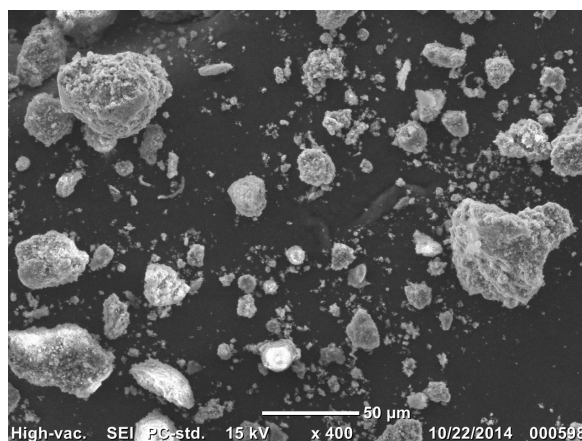
Фотографии электронного растрового микроскопа Jeol 6000 отобранных конденсированных продуктов сгорания исследуемых образцов СТТ представлены на рис. 8. Массовое распределение частиц КПС образцов СТТ по размерам, полученное на анализаторе размеров частиц Analysette 22 в дистиллированной воде с ультразвуком, показано на рис. 9. Вследствие объединения всех фракций КПС для одинаковых образцов СТТ, результаты измерений фактически соответствуют параметрам фракции частиц менее 160 мкм, поскольку эта фракция представляет основную массу КПС. Массовая доля фракции мельче 160 мкм составляла 0,95 и 0,94 всей массы КПС для с СТТ с Alex и Alex+Fe, соответственно.

Отметим, что частичная замена НП алюминия Alex на железо в составе СТТ приводит к уменьшению среднемассового диаметра частиц d_{43} КПС с 37,4 до 33,5 мкм.

Содержание аморфных фаз в образцах КПС образца 1 с Alex составляло 18 масс. %, образца 2 с Alex+Fe – 22 масс. %. Фазовый состав отобранных КПС исследуемых образцов СТТ без учета аморфных фаз, полученный с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD 6000, представлен в табл. 4. Установлено, что частичная замена НП Alex на железо в составе СТТ приводит к увеличению содержания оксида алюминия α -Al₂O₃ (корунда) на 2,3 масс. %, нитрида алюминия на 1,2 масс. % и нитрида углерода на 8,9 масс. %, к снижению содержания моноклинного оксида алюминия θ -Al₂O₃ на 12 масс. % и γ -Al₂O₃ (тетрагона) на 0,5 масс. % за счет возможного увеличения температуры и, соответственно, скорости химических реакций в газофазной зоне горения СТТ и окисления частиц НП алюминия и железа на поверхности реакционного слоя образца.

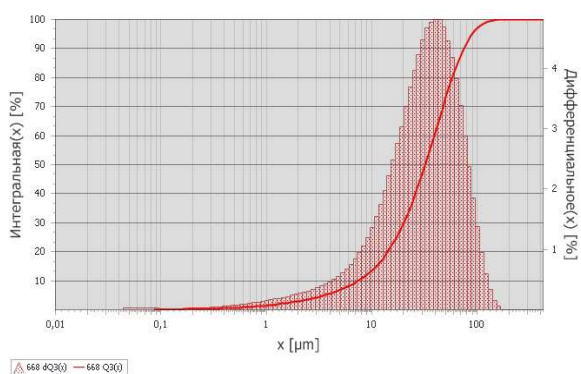


a)

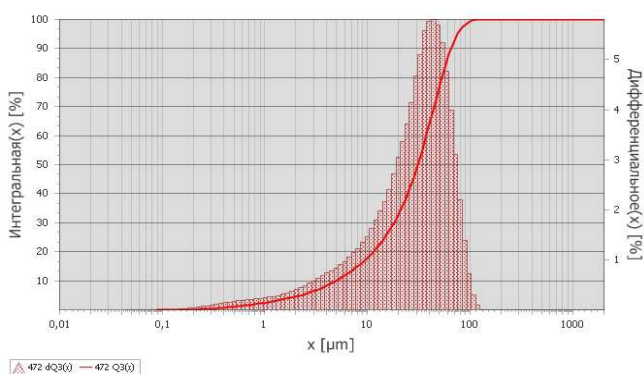


б)

Рис. 8. Фотографии электронного растрового микроскопа КПС образцов СТТ с Alex (*a*) и Alex+Fe (*б*)



a)



б)

Рис. 9. Массовое распределение частиц по размерам отобранных КПС образцов СТТ с Alex (*a*) и Alex+Fe (*б*)

Таблица 4

Фазовый состав отобранных КПС образцов СТТ

Образец СТТ	Фазовый состав КПС, масс. %				
	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	$\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	AlN	C_3N_4
1, Alex	7,1	66,7	2,0	7,1	17,1
2, Alex+Fe	9,4	54,7	1,6	8,3	26,0

Таким образом, в результате комплексного экспериментального исследования характеристик зажигания и горения составов СТТ на основе ПХА и СКДМ-80 можно предположить, что частичная замена НП алюминия на порошок железа в количестве 2 масс. % приводит к увеличению температуры поверхности реакционного слоя и скорости оттока продуктов газификации с поверхности горения образца, а также градиента температуры и скорости химических реакций в газовой фазе за счет возможного дополнительного выделения тепла при взаимодействии термитной смеси нанопорошков $\text{Al}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ и каталитического эффекта [4], уменьшающего температуру начала высокотемпературного разложения перхлората аммония в реакционном слое смесового твердого топлива.

ВЫВОДЫ

Исследовано влияние 2 масс. % добавки НП железа в состав смесового твердого топлива на основе ПХА, бутадиенового каучука СКДМ-80, содержащего 15,7 масс. % НП алюминия Alex, на характеристики зажигания и горения топлив, а также состав конденсированных продуктов сгорания.

Установлено, что частичная замена Alex на порошок железа в составе смесового твердого топлива приводит к снижению времени задержки зажигания в 1,3 – 1,9 раза в диапазоне плотности теплового потока 55 – 220 Вт/см² и увеличению реактивной силы оттока продуктов газификации от поверхности горения образца с 3,3 до 4,2 мН, при этом температура поверхности реакционного слоя в момент появления пламени увеличивается на 22 – 32 %. Степенной показатель закона скорости горения уменьшается с 0,51 до 0,43, а линейная скорость горения увеличивается на 30 – 45 % в диапазоне давления азота в бомбе постоянного давления 2,0 – 7,5 МПа.

Анализ отобранных конденсированных продуктов сгорания показал, что добавка НП железа в состав СТТ уменьшает относительную массу конденсированных продуктов с 0,25 до 0,19 и среднемассовый диаметр частиц d_{43} с 37,4 до 33,5 мкм. При этом в конденсированных продуктах сгорания увеличивается содержание оксида алюминия α -Al₂O₃ на 2,3 масс. %, нитрида алюминия AlN – на 1,2 масс. % и нитрида углерода C₃N₄ – на 8,9 масс. %, снижается содержание моноклинного оксида алюминия θ -Al₂O₃ на 12 масс. % и оксида алюминия γ -Al₂O₃ – на 0,5 % за счет возможного увеличения градиента температуры и скорости химических реакций в газовой зоне горения смесового твердого топлива.

Работа частично поддерживалась РФФИ (проект № 15-03-04321 «Воспламенение и горение частиц комбинированного металлического горючего на основе алюминия и бора»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комарова М.В., Комаров В.Ф., Вакутин А.Г., Яценко А.В. Влияние наноразмерных биметаллических частиц на характеристики горения смесового топлива // Ползуновский вестник. 2010. № 4-1. С. 112-116.
2. Архипов В.А., Коротких А.Г., Громов А.А., Кузнецов В.Т., Пестерев А.В., Евсеенко И.А. Влияние каталитических добавок порошков металлов на зажигание высокоэнергетических материалов // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54, № 11/3. С. 299-306.
3. Муравьев Н.В., Моногаров К.А., Мееров Д.Б., Орджоникидзе О.С., Пивкина А.Н., Фролов Ю.В. Влияние диоксида титана на горение октогена // Горение и взрыв. 2011. Т. 4, № 4. С. 225-228.
4. Бернер М.К., Зарко В.Е., Талавар М.Б. Наночастицы энергетических материалов: способы получения и свойства (обзор) // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, № 6. С. 3-30.
5. Архипов В.А., Бондарчук С.С., Коротких А.Г., Кузнецов В.Т., Громов А.А., Волков С.А., Ревягин Л.Н. Влияние дисперсности алюминия на характеристики зажигания и нестационарного горения гетерогенных конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48, № 5. С. 148-159.
6. Глотов О.Г., Ягодников Д.А., Воробьев В.С., Зарко В.Е., Симоненко В.Н. Воспламенение, горение и агломерация капсулированных частиц алюминия в составе смесового твердого топлива. II. Экспериментальные исследования агломерации // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 3. С. 83-97.
7. Архипов В.А., Коротких А.Г., Кузнецов В.Т., Раздобрев А.А., Евсеенко И.А. Влияние дисперсности порошка алюминия на характеристики зажигания смесовых композиций лазерным излучением // Химическая физика. 2011. Т. 30, № 7. С. 68-76.
8. Громов А.А., Ильин А.П., Хабас Т.А., Попенко Е.М., Коротких А.Г., Архипов В.А., Дитц А.А., Строкова Ю.И., Толбанова Л.О. Горение нанопорошков металлов. Томск : Дельтаплан, 2008. 382 с.
9. Архипов В.А., Кискин А.Б., Зарко В.Е., Коротких А.Г. Лабораторная методика измерения единичного импульса твердого ракетного топлива // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50, № 5. С. 134-137.
10. Архипов В.А., Ворожцов А.Б., Горбенко Т.И., Коротких А.Г., Савельева Л.А., Сакович Г.В. Способ получения смесового твердого топлива // Патент РФ № 2429282, 2011. Бюл. № 26.
11. Комаров В.Ф., Комарова М.В., Ворожцов А.Б., Лернер М.И., Домашенко В.В. Процессы, протекающие в высокоэнергетических системах, содержащих наноразмерный алюминий и другие нанометаллы // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 4. С. 3-7.

EFFECT OF IRON POWDER ON IGNITION AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF COMPOSITE SOLID PROPELLANTS

^{1,2}Korotkikh A.G., ¹Arkhipov V.A., ³Glotov O.G., ³Kiskin A.B., ³Zarko V.E.

¹Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russia

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

³Institute of Chemical Kinetics and Combustion of SB RAS, Novosibirsk, Russia

SUMMARY. Effect of 2 wt. % iron nanopowder additive in the composition of composite solid propellants, containing 15.7 wt. % of aluminum nanopowder Alex, on the ignition and combustion characteristics of propellants and also on the composition of condensed combustion products was studied. It was found that partial replacement Alex by iron nanopowder in the composition of composite solid propellants leads to the decrease of the ignition delay time 1.3 – 1.9 times in the range of the heat flux density 55–220 W/cm² and to the increase of the reactive force of gasification products outflow from the burning surface of sample by 27 %, while the surface temperature of reaction layer is increased by 22 – 32 % at the moment of flame appearance. Law exponent of the burning rate is reduced from 0.51 to 0.43 and the burning rate is increased to 30 – 45 % in the range of nitrogen pressure in a constant pressure bomb 2.0 – 7.5 MPa. The analysis of the selected combustion products has shown that an additive of iron nanopowder decreases the relative mass of k-phase from 0.25 to 0.19. At the same time the content of aluminum oxide α -Al₂O₃, aluminum nitride AlN and carbon nitride increases and the content of monoclinic aluminum oxide θ -Al₂O₃ decreases due to the possible increase of the temperature gradient and the rate of chemical reactions in the gas phase combustion zone of composite solid propellant.

KEYWORDS: composite solid propellants, aluminum powder, iron, ignition delay time, laser radiation, impulse of reactive force, burning rate, condensed combustion products.

Коротких Александр Геннадьевич, доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник НИИ ПММ ТГУ, доцент энергетического института НИ ТПУ, тел. (3822)701-777, e-mail: korotkikh@tpu.ru

Архипов Владимир Афанасьевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом НИИ ПММ ТГУ, тел. (3822)529-656, e-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Глотов Олег Григорьевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ИХКГ СО РАН, тел. (383) 330-4847, e-mail: glotov@kinetics.nsc.ru

Кискин Александр Борисович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИХКГ СО РАН, e-mail: kiskin@kinetics.nsc.ru

Зарко Владимир Егорович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИХКГ СО РАН, тел. (383) 333-2292, e-mail: zarko@kinetics.nsc.ru