

УДК 536.46: 629.194.632.1

А.Г. КОРОТКИХ*, **, В.А. АРХИПОВ**, В.Е. ЗАРКО**, ***, О.Г. ГЛОТОВ***, А.Б. КИСКИН***,
С.А. ЯНКОВСКИЙ*, К.В. СЛЮСАРСКИЙ*

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ¹

Представлена методика комплексного экспериментального исследования характеристик зажигания и горения твердых топлив для определения времени задержки газификации и зажигания, реактивной силы оттекающих от поверхности горения продуктов газификации, скорости горения, количества и размера частиц конденсированных продуктов горения исследуемых образцов в лабораторных условиях. Полученные результаты измерений показывают, что частичная замена ультрадисперсного порошка алюминия Al_x на ультрадисперсный порошок железа в составе смесового твердого топлива на основе перхлората аммония, бутадиенового каучука СКДМ-80 приводит к увеличению времени задержки газификации в 25 раз и снижению времени задержки зажигания в 1.6 раза при максимальном значении плотности потока излучения 65 Вт/см², увеличению реактивной силы оттекающих от поверхности горения продуктов газификации на 26 % и скорости горения на 24 % при давлении азота 3.9 МПа в бомбе постоянного давления, уменьшению относительной массы частиц конденсированных продуктов горения на 28 % и их среднего диаметра на 12 %.

Ключевые слова: твердое топливо, ультрадисперсный порошок алюминия, время задержки газификации и зажигания, реактивная сила, скорость горения, конденсированные продукты сгорания, фазовый и гранулометрический состав частиц.

Введение

Основными характеристиками зажигания и горения ракетных твердых топлив (ТТ), позволяющими оценить их воспламеняемость и энергетику в процессе сжигания в энергосиловых установках, являются зависимости времени задержки зажигания от плотности теплового потока или температуры, скорости горения от давления окружающей среды, а также единичный импульс реактивной силы, равный приросту величины тяги, реализуемому при сгорании единицы массы твердого топлива.

В настоящее время в мире существует большое разнообразие установок, позволяющих проводить исследования в области зажигания твердых топлив и определять их основные энергетические характеристики. Условно их можно разделить на три группы: установки монохроматического лучистого радиационного нагрева на базе CO₂- и твердотельных лазеров, интегрального лучистого радиационного нагрева с использованием ксеноновых ламп; установки конвективного (различные печи) и кондуктивного нагрева (нагретые блоки, пластины) [1–3]. На основании измеренных данных времени задержки зажигания от плотности теплового потока можно определить кинетические константы процесса зажигания. Для исследования характеристик горения ТТ в основном используются бомбы постоянного объема и давления [4–7], позволяющие определять линейную скорость горения твердых топлив и ее зависимость от давления. Специализированные бомбы (см., например, [7]) служат для отбора частиц конденсированных продуктов сгорания. Для измерения единичного импульса реактивной силы оттока продуктов сгорания от поверхности горения твердых топлив используется баллистический маятник [8, 9], регистрирующий отклонение центра масс маятника от положения равновесия при сжигании ТТ в ракетном двигателе. Недостатком такого способа измерения единичного импульса является необходимость использования модельных ракетных двигателей с зарядом твердого топлива массой не менее 0.2–0.5 кг и потребность в специальном стендовом оборудовании, размещенном во взрывозащитных боксах.

В данной работе представлена методика комплексного экспериментального исследования характеристик зажигания и горения твердых топлив для определения более широкого круга параметров: времени задержки газификации и воспламенения твердых топлив, реактивной силы отте-

¹ Работа частично поддержана ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.»: «Разработка новых высокоэнергетических материалов (ВЭМ) и технических решений для перспективных схем гибридных двигателей космического назначения».

кающих от поверхности горения продуктов газификации, температуры поверхности реакционного слоя в период воспламенения, линейной скорости горения твердого топлива, количества, фазового состава и распределения частиц конденсированных продуктов сгорания (КПС) исследуемых твердотопливных смесевых составов массой $\sim 1\text{--}5$ г в лабораторных условиях.

Методика исследования

Исследуемые образцы ТТ

Для исследования основных характеристик зажигания и горения использовали два смесевых состава ТТ. Первый – базовый состав ТТ, содержащий 64.6 мас. % бидисперсный перхлорат аммония (ПХА) (фракции мельче 50 и 160–315 мкм в соотношении 40/60); 19.7 мас. % бутадиеновый каучук марки СКДМ-80, пластифицированный трансформаторным маслом; 15.7 мас. % металлическое горючее – ультрадисперсный порошок (УДП) алюминия Alex, полученный в аргоне методом электрического взрыва проводников со сроком хранения 1 год. Во втором смесевом составе ТТ Alex частично замещался на 2 мас. % каталитической добавки – УДП железа. Фотографии частиц УДП алюминия Alex, полученные на электронном растровом микроскопе Merlin с разным увеличением, и функции массового распределения частиц по размерам, полученные на лазерном анализаторе размера частиц Analysette 22 в дистиллированной воде с ультразвуком, используемых порошков металлов представлены на рис. 1–2.

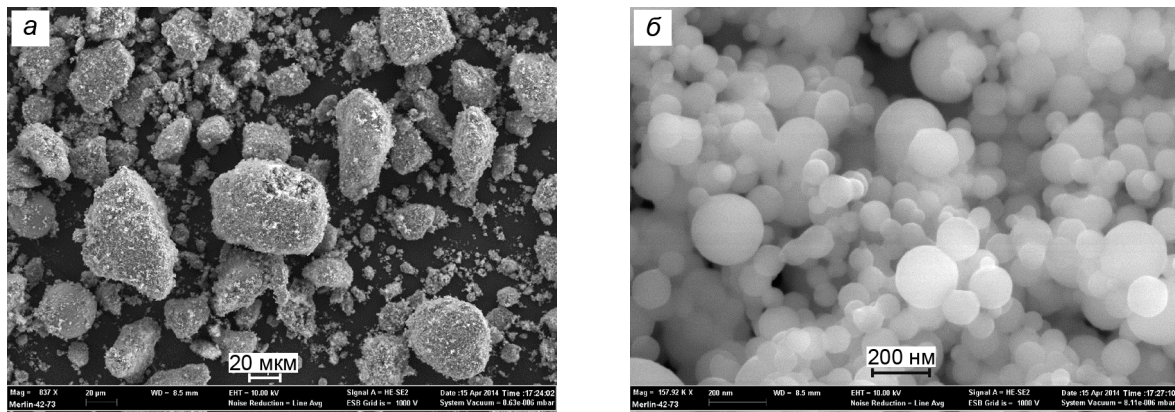


Рис. 1. Фотографии агрегированных частиц УДП Alex при длительном хранении в закрытой емкости, полученные на электронном растровом микроскопе при разном увеличении

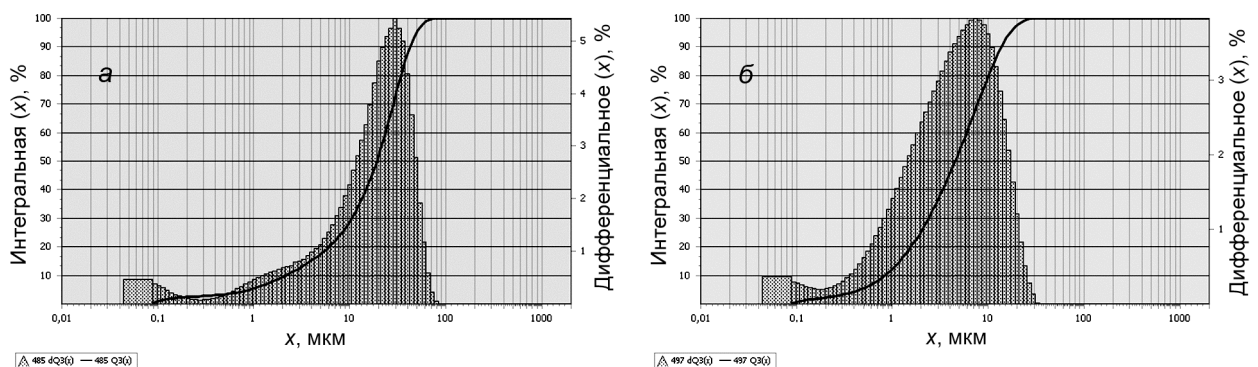


Рис. 2. Функции массового распределения агрегированных частиц по размерам исходных УДП Alex (а) и Fe (б), полученные на анализаторе размеров частиц Analysette 22

В практической работе с УДП Alex обнаружилось, что в период длительного хранения (~ 2 года) в закрытой емкости при нормальных условиях происходит образование агрегированных частиц микронного размера, состоящих из наноразмерных частиц алюминия, покрытых оксидно-гидроксидным слоем (процесс образования происходит без плавления алюминия). Согласно данным измерения, на анализаторе размера частиц среднемассовый диаметр агрегированных частиц УДП Alex составляет $d_{43} = 21.0$ мкм (рис. 2, а), УДП Fe – $d_{43} = 6.1$ мкм (рис. 2, б), что на порядок

больше, чем размер отдельных частиц (рис. 1, б). Однако, агрегированные микроразмерные частицы УДП металлов имеют пористую структуру, большую удельную площадь поверхности и высокую реакционную способность [2]. Согласно измерениям на БЭТ-анализаторе Nova 2200e удельная площадь поверхности используемого УДП Alex в азоте составляет $7.04 \text{ м}^2/\text{г}$, УДП Fe – $1.08 \text{ м}^2/\text{г}$. Ультрадисперсный порошок Alex, полученный методом электровзрыва проводников в различных газовых средах, при хранении адсорбирует до 5 мас. % газов, в основном водорода [11]. В предыдущих работах [2, 4, 12–14] при изготовлении смесевых образцов ТТ с помощью специальной технологии получали равномерное распределение частиц УДП Alex в матрице смесевых образцов ТТ. В работе [15] показано, что при изготовлении смесевых топливных композиций с применением УДП металлов и растворов полимеров окончательное формирование структуры композиционного материала сопровождается перестройкой и изменением дисперсного состава металлических агрегированных частиц.

Исследуемые цилиндрические образцы смесевого ТТ диаметром 10 мм и высотой 30 мм изготавливали по технологии [16] в лабораторных условиях с помощью порционного перемешивания компонентов с последующим проходным прессованием. Плотность отвержденных смесевых образцов ТТ в зависимости от компонентного состава составляла $1.53\text{--}1.56 \text{ г}/\text{см}^3$. Для проведения эксперимента выбирали одинаковые по плотности образцы ТТ. Для исследуемых составов ТТ разброс плотности образцов не превышал $0.02 \text{ г}/\text{см}^3$.

Зажигание ТТ

Исследование процесса зажигания смесевых составов ТТ осуществлялось с использованием установки лучистого нагрева на основе CO_2 -лазера непрерывного действия с длиной волны излучения 10.6 мкм и максимальной мощности 100 Вт (рис. 3). Перед опытом образцы ТТ нарезались на таблетки высотой 5 мм . При этом торцевая поверхность образцов визуально контролировалась на отсутствие пор, углублений и трещин. Образцы ТТ помещались в эбонитовый полый цилиндр высотой 10 мм для бронирования боковой поверхности и создания одномерного течения продуктов горения.

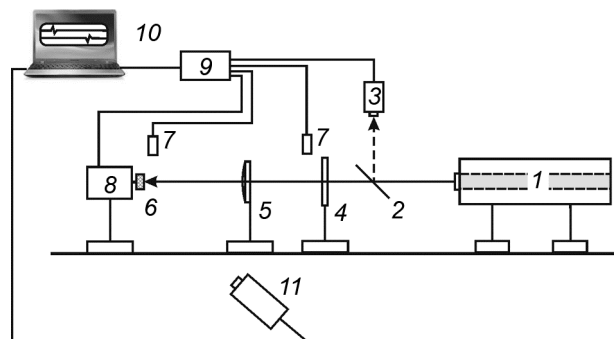


Рис. 3. Схема экспериментальной установки на основе CO_2 -лазера: 1 – CO_2 -лазер; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – измеритель мощности излучения; 4 – затвор; 5 – линза; 6 – образец ТТ; 7 – фотодиоды; 8 – измеритель реактивной силы; 9 – АЦП; 10 – ПК; 11 – тепловизионная камера

Исследуемый образец 6 ТТ 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 ТТ 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 ТТ определяли по разности моментов изменения сигнала фотодиода 7 у затвора или термопары, установленной перпендикулярно к оси лазерного луча после затвора и измерителя величины реактивной силы 8. Первый (фотодиод) регистрировал момент открытия затвора 4, второй – появление реактивной силы оттекающих продуктов газификации от торцевой (облучаемой) поверхности образца. Время задержки зажигания t_{ign} ТТ определяли по разности моментов 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 ТТ, измерялась с помощью термоэлектрического датчика 3. Определялось максимальное значение мощности излучения в центре лазерного луча.

Измерение величины реактивной силы оттока продуктов газификации с торцевой поверхности образца в процессе прогрева реакционного слоя, зажигания и горения ТТ осуществлялось с помощью датчика 8 [10]. Предварительно осуществлялась его градуировка в вертикальном положении с помощью грузов определенной массы.

Измерение температурного поля на поверхности реакционного слоя исследуемых образцов ТТ проводили с помощью тепловизионной камеры марки Jade J 530 SB [12] в инфракрасной области спектра 2.5–2.7 мкм с цифровой записью на персональном компьютере. Коэффициент излучения торцевой поверхности образцов измерялся на шаровом фотометре и был равен ~ 0.9 . При обработке значений температур в программном комплексе Altair на ПК коэффициент излучения принимался постоянным при нагреве и зажигании образца ТТ. Погрешность измерения температур на поверхности образца составляла не более 10 % при частоте кадров 50 Гц.

Горение ТТ

Исследование процесса горения ТТ осуществлялось в азоте при варьируемых избыточных давлениях в проточной бомбе постоянного давления с отбором конденсированных продуктов сгорания образцов (рис. 4).

Образцы ТТ имели форму цилиндра диаметром 10 мм и высотой 15–20 мм. Боковая поверхность образцов бронировалась термостойким каучуком «солпрен» (сополимер стирена и бутадие-на). При сгорании бронировки образовывались углеродистые частицы, содержание которых в конденсированных продуктах сгорания не превышало 1 мас. %. К заднему торцу бронированного образца ТТ приклеивалась подложка из оргстекла. На передний торец образца наносилась воспламеняющая паста.

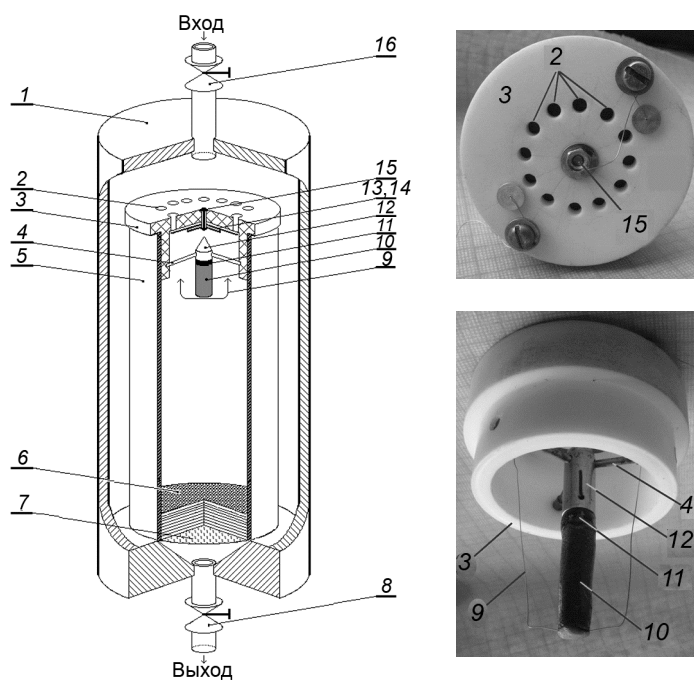


Рис. 4. Конструкция проточной бомбы постоянного давления с отбором конденсированных продуктов сгорания ТТ: 1 – корпус бомбы; 2 – отверстия в крышке 3; 3 – верхняя крышка внутреннего цилиндра 5; 4 – спицы; 5 – тонкостенный внутренний цилиндр; 6 – пакет металлических ситовых сеток; 7 – аэрозольный фильтр типа АФА; 8 – выпускной вентиль; 9 – проволока поджига; 10 – образец ТТ; 11 – подложка; 12 – обтекатель; 13 – резиновый диск; 14 – фторопластовый диск-шайба; 15 – центральный винт; 16 – впускной вентиль

Образец твердого топлива 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 инертным газом, 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 крыш-

ки 3. При продувке бомбы инертным газом край резинового диска 13 отгибался и впускал газ внутрь цилиндра 5. При поджигании образца 10 ТТ 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 ТТ 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.

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 ТТ.

После сжигания образца ТТ 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 КПП, 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 САРТОГОСМ МВ 210-А с погрешностью не более 0.1 мг и проводили визуальный осмотр частиц под оптическим микроскопом МБС-10 с целью выявления типичных особенностей строения частиц. Затем ситовые фракции порошков КПП смешивали и проводили измерение массового распределения частиц по размерам на анализаторе размера частиц Analysette 22 и фазового состава порошков на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD 6000.

Результаты исследования

Определены значения времени задержки газификации и зажигания, температуры поверхности реакционного слоя, величины реактивной силы исследуемых смесевых составов ТТ в воздухе при нормальных условиях с использованием установки лучистого нагрева на основе CO_2 -лазера. Результаты измерения, полученные с помощью датчика реактивной силы продуктов газификации, оттекающих от торцевой поверхности образцов ТТ (времена задержки газификации t_{gas} и воспламенения t_{ign} , величина реактивной силы продуктов газификации F), представлены на рис. 5.

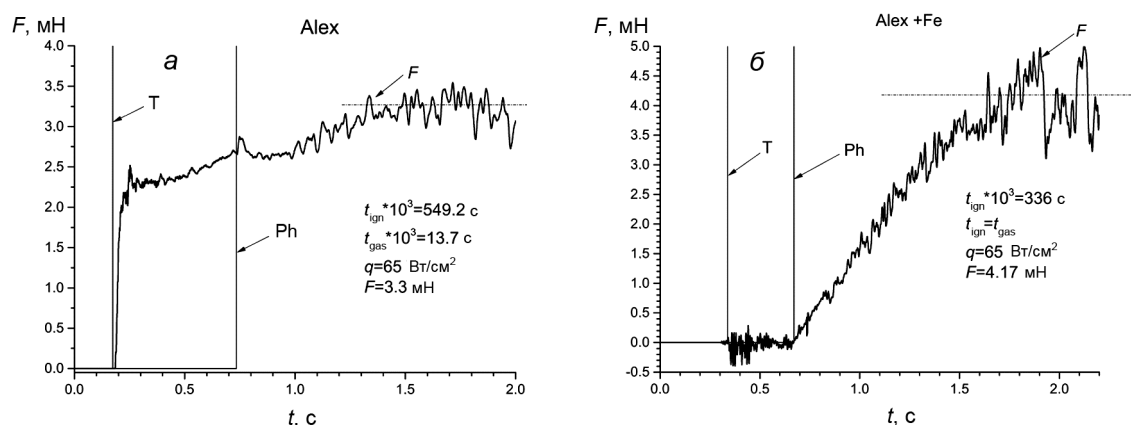


Рис. 5. Сигналы от термодары (Т), фотодиода (Ph) и датчика реактивной силы (F) оттока продуктов газификации от времени при зажигании смесевых образцов ТТ с Alex (а) и Alex+Fe (б)

Установлено, что для образца ТТ, содержащего Alex, t_{gas} в 40 раз меньше, чем t_{ign} при иницировании лазерным потоком излучения $q = 65 \text{ Вт/см}^2$. Для образца ТТ, содержащего смесь УДП Alex+Fe, моменты времени начала газификации и зажигания совпадают. Частичная замена УДП Alex на УДП Fe в составе ТТ приводит к увеличению t_{gas} в 25 раз, сокращению t_{ign} в 1.6 раза и увеличению величины реактивной силы F в 1.3 раза в стадии стационарного горения образца ТТ. При этом температура поверхности реакционного слоя образца в момент появления пламени увеличивается на 22–32 % в зависимости от значения плотности потока излучения (табл. 1).

Таблица 1

**Температура поверхности реакционного слоя ТТ в момент появления пламени
при постоянном коэффициенте излучения 0.9**

q , Вт/см ²	Температура поверхности реакционного слоя T , °С	
	Alex (образец 1)	Alex+Fe (образец 2)
33	590 ± 50	720 ± 70
79	720 ± 80	950 ± 110

Получены значения линейной скорости горения u исследуемых смесевых составов ТТ при горении в азоте с давлением 3.9 МПа в проточной бомбе постоянного давления с отбором конденсированных продуктов сгорания (табл. 2). В табл. 2 также представлены значения относительной массы конденсированных продуктов сгорания образцов m_{cpp} , равной отношению массы КПС к начальной массе образца ТТ.

Таблица 2

**Скорость горения и относительная масса конденсированных продуктов сгорания ТТ
в азоте при давлении 3.9 МПа**

Образец ТТ	u , мм/с	$m_{cpp} = M_{cpp}/M_{samp}$
1, Alex	12.5 ± 0.4	0.247
2, Alex+Fe	15.5 ± 0.2	0.193

Установлено, что частичная замена УДП Alex на Fe в смесевом составе ТТ приводит к увеличению скорости горения на 24 % и уменьшению относительной массы конденсированных продуктов сгорания на 28 %. При этом среднемассовый диаметр частиц d_{43} КПС уменьшается от 37.4 до 33.5 мкм. Массовое распределение частиц по размерам КПС исследуемых образцов, полученное на анализаторе размеров частиц Analysette 22 в дистиллированной воде с ультразвуком, представлено на рис. 6. Заметим, что вследствие объединения всех фракций КПС перед анализом 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 ТТ с Alex и Alex+Fe соответственно. Вместе с тем методика отбора [7] благодаря фракционированию частиц позволяет детально характеризовать крупные частицы КПС. Для сравниваемых ТТ доля крупных частиц мала, и эта возможность фактически не использовалась.

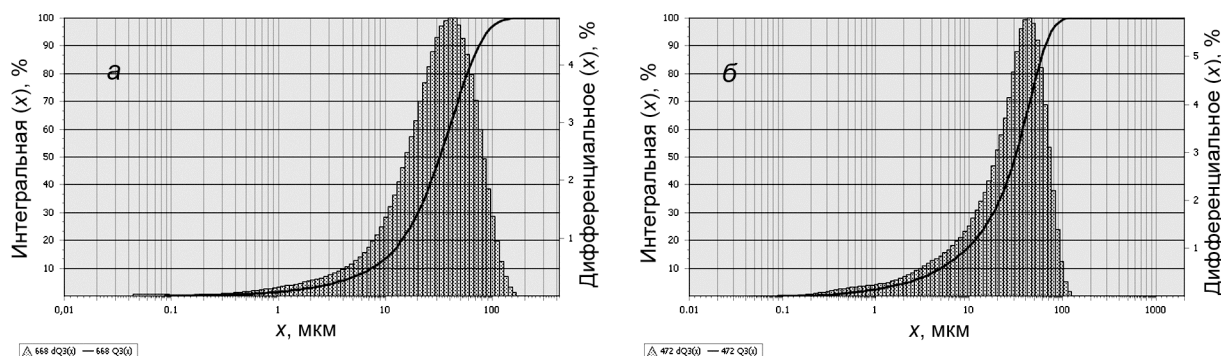


Рис. 6. Массовое распределение частиц по размерам отобранных КПС при сгорании образцов ТТ с Alex (а) и Alex+Fe (б)

Фазовый состав отобранных КПС исследуемых образцов ТТ без учета аморфных фаз, полученный с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD 6000, представлен в табл. 3. Установлено, что частичная замена УДП Alex на Fe в составе ТТ приводит к увеличению содержания оксида алюминия α -Al₂O₃ (корунда) на 2.3 мас. %, нитрида алюминия на 1.2 мас. % и нитрида углерода на 8.9 мас. %, к снижению содержания моноклинного оксида алюминия m -Al₂O₃ на 12 мас. % и γ -Al₂O₃ на 0.5 мас. % за счет возможного увеличения температуры и соответственно

скорости химических реакций в газофазной зоне горения ТТ и окисления частиц УДП алюминия и железа на поверхности реакционного слоя образца.

Таблица 3

Фазовый состав отобранных КПС образцов ТТ

Образец ТТ	Фазовый состав КПС, мас. %				
	α -Al ₂ O ₃	<i>m</i> -Al ₂ O ₃	γ -Al ₂ O ₃	AlN	C ₃ N ₄
1, Alex	7.07	66.71	2.06	7.10	17.06
2, Alex+Fe	9.40	54.73	1.58	8.33	25.96

Таким образом, в результате комплексного исследования характеристик зажигания и горения смесового состава ТТ на основе ПХА и СКДМ-80 и на основе полученных экспериментальных данных можно предположить, что частичная замена УДП алюминия на УДП железа в количестве 2 мас. % приводит к увеличению скорости химических реакций в конденсированной фазе за счет возможного экзотермического эффекта при взаимодействии термитной смеси порошков Al+Fe в реакционном слое, увеличения градиента температур в прогретом слое и зоне газофазных реакций при горении твердого топлива.

Выводы

1. Предложена методика комплексного экспериментального исследования характеристик зажигания и горения твердых топлив с целью получения более широкого круга параметров: времени задержки газификации и зажигания, температуры поверхности реакционного слоя, величины реактивной силы оттекающих от поверхности горения продуктов газификации, линейной скорости горения, количества, размера частиц и фазового состава конденсированных продуктов сгорания исследуемых образцов топлива в лабораторных условиях.

2. Установлено, что частичная замена ультрадисперсного порошка алюминия Alex на порошок железа в составе смесового твердого топлива на основе перхлората аммония, бутадиенового каучука СКДМ-80 приводит к существенному увеличению времени задержки газификации от 14 до 336 мс и снижению времени задержки зажигания от 549 до 336 мс при постоянной плотности потока лазерного излучения 65 Вт/см², а также к увеличению температуры поверхности реакционного слоя на 22–32 %, величины реактивной силы, оттекающих от поверхности горения продуктов газификации от 3.3 до 4.2 мН и линейной скорости горения от 12.5 до 15.5 мм/с при давлении азота 3.9 МПа в бомбе постоянного давления.

3. Анализ отобранных продуктов сгорания показал, что добавка УДП железа в количестве 2 мас. % в исследуемый смесовой состав твердого топлива уменьшает относительную массу $m_{сpp}$ от 0.247 до 0.193 и среднемассовый диаметр конденсированных частиц d_{43} от 37.4 до 33.5 мкм. При этом в конденсированных продуктах сгорания увеличивается содержание оксида алюминия α -Al₂O₃ на 2.3 мас. %, нитрида алюминия AlN – на 1.2 мас. % и нитрида углерода C₃N₄ – на 8.9 мас. %, снижается содержание моноклинного оксида алюминия *m*-Al₂O₃ на 12 мас. % и оксида алюминия γ -Al₂O₃ – на 0.5 % за счет возможного увеличения температуры и скорости химических реакций в газофазной зоне горения смесового твердого топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vilyunov V. N., Zarko and V. E. Ignition of Solids. – Amsterdam; Oxford; New York; Tokyo: Elsevier Science Publishers, 1989. – 442 p.
2. Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Г., Кузнецов В. Т., Громов А. А., Волков С. А., Ревягин Л. Н. // Физика горения и взрыва. – 2012. – Т. 48. – № 5. – С. 148–159.
3. Stacy S. C., and Pantoya M. L. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2013. – Iss. 38. – P. 441–447.
4. Сакович Г. В., Архипов В. А., Ворожцов А. Б., Бондарчук С. С., Певченко Б. В. // Российские нанотехнологии. – 2010. – Т. 5. – № 1–2. – С. 89–101.
5. Ulas A., Risha G. A., Kuo K. K. // Fuel. – 2006. – Iss. 85. – P. 1979–1986.
6. Де Лука Л. Т., Галфетти Л., Северини Ф., Меда Л., Марра Ж., Ворожцов А. Б., Седой В. С., Бабук В. А. // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41. – № 6. – С. 80–94.
7. Глотов О. Г., Ягодников Д. А., Воробьев В. С., Зарко В. Е., Симоненко В. Н. // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43. – № 3. – С. 83–97.
8. Соркин Р. Е. Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
9. Зельдович Я. Б., Ривин М. А., Франк-Каменецкий Д. А. Импульс реактивной силы пороховых ракет. – М.: Оборонгиз, 1963. – 190 с.

10. Кискин А.Б., Симоненко В.Н. // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36. – № 1. – С. 52–58.
11. 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.
12. Arkhipov V.A., Korotkikh A.G. // Combustion and Flame. – 2012. – V. 159. – Iss. 1. – P. 409–415.
13. Архипов В.А., Коротких А.Г., Кузнецов В.Т., Раздобреев А.А., Евсеенко И.А. // Химическая физика. – 2011. – Т. 30. – № 7. – С. 68–76.
14. Архипов В.А., Коротких А.Г., Кузнецов В.Т., Синогина Е.С. // Химическая физика. – 2007. – Т. 26. – № 6. – С. 58–67.
15. Комарова М.В., Комаров В.Ф., Ворожцов А.Б. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 12. – С. 107–111.
16. Архипов В.А., Ворожцов А.Б., Горбенко Т.И., Коротких А.Г., Савельева Л.А., Сакович Г.В. Способ получения смешанного твердого топлива // Патент на изобретение № 2429282, МПК С10L 9/10, В82В 3/00. Заявл. 10.12.2008. Опубл. 20.09.2011. Бюл. № 26.

*Энергетический институт Национального исследовательского
Томского политехнического университета, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 12.09.14.

**Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета, г. Томск, Россия

***Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН,
г. Новосибирск, Россия
E-mail: korotkikh@tpu.ru; leva@niipmm.tsu.ru

Коротких Александр Геннадьевич, д.ф.-м.н., доцент;
Архипов Владимир Афанасьевич, д.ф.-м.н., профессор;
Зарко Владимир Егорович, д.ф.-м.н., профессор;
Глотов Олег Григорьевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией;
Кискин Александр Борисович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Янковский Станислав Александрович, ассистент;
Слюсарский Константин Витальевич, аспирант.

*A.G. KOROTKIKH**, **, *V.A. ARKHIPOV***, *V.E. ZARKO***, ***, *O.G. GLOTOV****, *A.B. KISKIN****,
*S.A. YANKOVSKIY**, *K.V. SLYUSARSKIY**

TECHNIQUE FOR COMPLEX STUDY OF THE IGNITION AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF SOLID PROPELLANTS

The technique is presented for complex experimental study of the characteristics of ignition and combustion of solid propellants to determine the delay time of gasification and ignition, the recoil force of gasification products outflow from burning surface, the burning rate and quantity, particle size of the combustion condensed products of investigated samples in the laboratory. The obtained measurement results show that the partial replacement of the aluminum ultrafine powder Alex on iron ultrafine powder in the composite solid propellant based on ammonium perchlorate, butadiene rubber SKDM-80 leads to increase the gasification delay time in 25 times and reduce the ignition delay time in 1.6 times at the maximum value of radiation density flux 65 W/cm^2 , increase the recoil force of gasification products outflow from the burning surface by 26 % and the burning rate by 24 % at a nitrogen pressure of 3.9 MPa in the bomb of constant pressure, decrease the relative mass by 28 % and particle average diameter by 12 % of the condensed combustion products.

Keywords: *solid propellant, ultrafine powder of aluminum, delay time of gasification and ignition, recoil force, burning rate, particle size, phase structure of the combustion products.*

REFERENCES

1. Vilyunov V.N., and Zarko V.E. *Ignition of Solids*. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, Elsevier Science Publishers, 1989, 442 p.
2. Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Korotkikh A.G., Kuznetsov V.T., Gromov A.A., Volkov S.A., Revyagin L.N. Influence of aluminum particle size on ignition and nonstationary combustion of heterogeneous condensed systems. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2012, vol. 48, no. 5, pp. 625–635. doi: 10.1134/S0010508212050140.
3. Stacy S.C. and Pantoya M.L. Laser ignition of nano-composite energetic loose powders. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2013, iss. 38, pp. 441–447. doi: 10.1002/prop.201200157.
4. Sakovich G.V., Arkhipov V.A., Vorozhtsov A.B., Bondarchuk S.S., Pevchenko B.V. Investigation of combustion of HEM with aluminum nanopowders. *Nanotechnologies in Russia*, 2010, vol. 5, no. 1–2, pp. 91–107. doi: 10.1134/S1995078010010106.
5. Ulas A., Risha G.A., Kuo K.K. Ballistic properties and burning behaviour of an ammonium perchlorate/guanidine nitrate/sodium nitrate airbag solid propellant. *Fuel*, 2006, iss. 85, pp. 1979–1986. doi: 10.1016/j.fuel.2006.03.026.
6. De Luca L.T., Galfetti L., Severini F., Meda L., Marra G., Vorozhtsov A.B., Sedoi V.S., Babuk V.A. Burning of nano-aluminized composite rocket propellants. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 680–692. doi: 10.1007/s10573-005-0080-5.
7. Glotov O.G., Zarko V.E., Simonenko V.N., Yagodnikov D.A., Vorob'ev V.S. Ignition, combustion, and agglomeration of encapsulated aluminum particles in a composite solid propellant. II. Experimental studies of agglomeration. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2007, vol. 43, no. 3, pp. 320–333. doi: 10.1007/s10573-007-0045-y.
8. Sorkin R.E. *Gazotermodynamika raketnykh dvigateley na tverdom toplive* [Gas thermodynamics of rocket engines on solid propellant]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 368 p.
9. Zeldovich Ya.B., Rivin M.A., Frank-Kamenetskiy D.A. *Impul's reaktivnoi sily porohovykh raket* [The reaction force impulse of gunpowder rockets]. Moscow, Oborongiz Publ., 1963, 190 p.
10. Kiskin A.B., Simonenko V.N. Special features of implementation of the recoil-force registration method for burning-rate measurement. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2000, vol. 36, no. 1, pp. 48–53. doi: 10.1007/BF02701513
11. Gromov A.A., Ilyin A.P., Habas T.A., Popenko E.M., Korotkikh A.G., Arkhipov V.A., Ditz A.A., Strokova Yu.I., Tolbanova A.O. *Gorenie nanoposhkov metallov* [Combustion of metal nanopowders]. Tomsk, Del'toplan Publ., 2008, 382 p.
12. Arkhipov V.A., Korotkikh A.G. The influence of aluminum powder dispersity on composite solid propellants ignitability by laser radiation. *Combustion and Flame*, 2012, vol. 159, iss. 1, pp. 409–415. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.06.020.
13. Arkhipov V.A., Korotkikh A.G., Kuznetsov V.T., Razdobreev A.A., Evseenko I.A. Influence of the dispersity of aluminum powder on the ignition characteristics of composite formulations by laser radiation. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2011, vol. 5, no. 4, pp. 616–624. doi: 10.1134/S1990793111040026.
14. Arkhipov V.A., Korotkikh A.G., Kuznetsov V.T., Sinogina E.S. Vliyanie dispersnosti poroshkov metallov na harakteristiki konduktivnogo i luchistogo zazhiganiya smesevykh kompozitsiy [Influence of metals powders dispersity on the characteristics of conductive and radiative ignition of composite solid propellants]. *Khimicheskaya Fizika*, 2007, vol. 26, no. 6, pp. 58–67.
15. Komarova M.V., Komarov V.F., Vorozhtsov A.B. Processy, pronekayushie v vysokoenergeticheskikh sistemah, soderzhashih nanorazmernye poroshki metallov [The processes occurring in the high-energy systems, containing nanosized metal powders]. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2011, vol. 54, no. 12, pp. 107–111.
16. Arkhipov V.A., Vorozhtsov A.B., Gorbenko T.I., Korotkikh A.G., Savelieva L.A., Sakovich G.V., Arkhipov V.A., Zarko V.E., Kiskin A.B., Korotkikh A.G. *Sposob polucheniya smesevogo tverdogo topliva* [The method for producing of the composite solid propellant]. Patent RF, no. 2429282. 2008.