

Научная статья

УДК 536.46

doi: 10.17223/19988621/92/11

Экспериментальное исследование и моделирование горения металлизированного смесового твердого топлива с учетом распределения агломератов по размерам.

I. Эксперимент: методика, обработка, результаты

Василий Андреевич Порязов¹, Олег Григорьевич Глотов²,
Алексей Юрьевич Крайнов³, Дмитрий Алексеевич Крайнов⁴,
Иван Викторович Сорокин⁵, Григорий Сергеевич Суродин⁶

^{1,3} Томский государственный университет, Томск, Россия

^{2,5,6} Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского
Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

⁴ Томский политехнический университет, Томск, Россия

¹ poryazov@ff.tsu.ru

² glotov@kinetics.nsc.ru

³ a.krainov@ff.tsu.ru

⁴ kraynov@tpu.ru

⁵ sorokin@kinetics.nsc.ru

⁶ surodin83@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования горения модельных смесовых твердых топлив с порошками алюминия различной дисперсности. При трех уровнях давления (2, 4, 8 МПа) измерены скорости горения, проведены отборы конденсированных продуктов горения вблизи поверхности горения и определены их морфологические и гранулометрические характеристики, а также полнота сгорания алюминия; вычислена эффективность энерговыделения металлического горючего в составе топлива.

Ключевые слова: смесовое топливо, алюминий, конденсированные продукты горения, частицы, функция распределения, полнота сгорания, скорость горения

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 19-79-10054. Авторы благодарят Н.А. Осипову за помощь в подготовке образцов, О.Н. Житниக்குю, Е.А. Притчину, А.В. Ластовку за помощь в обработке экспериментов.

Для цитирования: Порязов В.А., Глотов О.Г., Крайнов А.Ю., Крайнов Д.А., Сорокин И.В., Суродин Г.С. Экспериментальное исследование и моделирование горения металлизированного смесового твердого топлива с учетом распределения агломератов по размерам. I. Эксперимент: методика, обработка, результаты // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 92. С. 125–143. doi: 10.17223/19988621/92/11

Experimental investigation and modeling of metallized composite solid propellant combustion with allowance for the size distribution of agglomerates. I. Experiment: methodology, processing, results

Vasily A. Poryazov¹, Oleg G. Glotov², Aleksey Yu. Krainov³,
Dmitriy A. Krainov⁴, Ivan V. Sorokin⁵, Grigory S. Surodin⁶

^{1, 3} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

^{2, 5, 6} Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

⁴ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

¹ poryazov@ff.tsu.ru

² glotov@kinetics.nsc.ru

³ a.krainov@ff.tsu.ru

⁴ kraynov@tpu.ru

⁵ sorokin@kinetics.nsc.ru

⁶ surodin83@yandex.ru

Abstract. Characteristics of condensed combustion products (CCPs) of propellants based on AP, aluminum, and the inert binder SKDM-80 with a variation in the dispersion of aluminum were studied by the sampling method. The experiments were carried out in the pressure range of 2–8 MPa in argon, the particles were quenched near the combustion surface. The data on burning rate, morphological and granulometric composition of CCPs, incompleteness of metal combustion and heat release efficiency of metallic fuel are presented. Some empirical factors indicate that the pathways of chemical reactions change with an increase in pressure. In particular, the amount of acidic products in the combustion products increases, and incompleteness of metal combustion also decreases. This leads to an increase in the energy efficiency of metallic fuel at a pressure of about 9 MPa for both propellants; however, propellant with Alex is inferior in this parameter to fuel with ASD-4 due to the higher initial oxidation of Alex powder as compared to ASD-4. The obtained set of experimental data can be used to validate the developed combustion models of aluminized propellants in the second paper of the cycle.

Keywords: composite propellant, aluminum, condensed combustion products, particle, size distribution, combustion completeness, combustion rate

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 19-79-10054. The authors thank N.A. Osipova for help in sample preparation, O.N. Zhitnitskaya, A.V. Lastovka for help in processing the experiments.

For citation: Poryazov, V.A., Glotov, O.G., Krainov, A.Yu., Krainov, D.A., Sorokin, I.V., Surodin, G.S. (2024) Experimental investigation and modeling of metallized composite solid propellant combustion with allowance for the size distribution of agglomerates. I. Experiment: methodology, processing, results. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 92. pp. 125–143. doi: 10.17223/19988621/92/11

Введение

Контактные методы диагностики дисперсной фазы горящего топлива, или методики отбора, общепризнанно считаются наиболее информативными с точки зрения получения практически востребованной информации [1]. Одна из лучших методик отбора разработана в ИХКГ СО РАН в 1980-х гг. Ее подробное описание представлено в [2–4]. Гашение частиц, покидающих поверхность горения образца топлива, горящего в сосуде высокого давления (СВД), осуществляется на заданном расстоянии от образца путем смешения струи продуктов горения образца со спутным потоком инертного газа, непрерывно продувающего сосуд. Погашенные частицы улавливаются пакетом металлических ситовых сеток и аналитическим аэрозольным фильтром типа АФА [5]. Преимуществами методики являются «мягкое» замораживание инертным газом и высокая представительность отбора частиц любых размеров, включая субмикронные.

По завершении серии экспериментов пакет сит и другие элементы внутренней оснастки СВД промывают в ацетоне, фильтры АФА также растворяют в ацетоне. В результате получается суспензия частиц конденсированных продуктов горения (КПГ). Суспензия делится на фракции с использованием мокрого и сухого просеивания через сита. Затем фракции подвергаются гранулометрическому и химическому анализу. Фракционирование позволяет с адекватной точностью провести анализ частиц любых размеров, применяя для каждой фракции наиболее подходящие методы гранулометрического анализа. В частности, крупные агломераты с размерами в сотни микрометров могут быть измерены под оптическим микроскопом, мелкие оксидные частицы – с использованием автоматических гранулометров. Технология отбора и препарирования частиц подробно описана в [3, 6, 7]. Совокупная функция распределения частиц КПГ по размерам вычисляется с использованием распределения частиц во фракциях и массовых вкладов фракций.

Цель работы – получение набора экспериментальных данных для валидации разработанной физико-математической модели горения смесевых металлизированных твердых топлив.

Методика проведения эксперимента

Эксперименты проведены с образцами топлив, состав которых приведен в табл. 1.

Таблица 1

Компонентный состав (мас. %) и обозначение модельных топлив

Топливо	Связующее	АСД-4	Alex	ПХА
555	19.7	15.7		64.6
560	19.7	10.7	5	64.6

Были использованы следующие компоненты: связующее – горючее-связующее СКДМ-80 – раствор дивинилового каучука в трансформаторном масле в соотношении 20/80 [8], связующее не имеет в своем составе кислорода; ПХА – перхлорат аммония – смесь двух размерных фракций, мельче 50 мкм и 160–315 мкм, в соот-

ношении 40:60; АСД-4 – алюминий сферический дисперсный с удельной поверхностью около $4\,000\text{ см}^2/\text{г}$; Alex – наноразмерный порошок алюминия, полученный методом электровзрыва проволок. Рецептуры всех топлив содержат отверждающий агент в количестве 0.5% сверх 100%. Идентификаторы (номера) топлив условные и не содержат информации о составе. Образцы имели форму цилиндров диаметром 1 см и длиной около 3 см (в точности такие же, как в [7]). Боковую поверхность бронировали несколькими слоями термостойкого каучука Solprene®, растворенного в четыреххлористом углероде. В такой постановке опытов образец в сгорающей бронировке горит в потоке инертного газа, так что гашение частиц, покидающих поверхность горения, происходит непосредственно вблизи образца. Дистанция гашения, оцененная как начальный участок смешения турбулентных спутных струй продуктов горения и инертного газа, составляет 2–3 см. Дисперсионный состав порошкообразных компонентов был предварительно охарактеризован подходящими методами гранулометрического анализа.

Эксперименты проводили в аргоне при начальном давлении $p = 2, 4$ и 8 МПа. В результате горения образца давление повышалось, и давлением в опыте считали среднее, равное полусумме начального и конечного давлений, плюс атмосферное 0.1 МПа. Типичные давления в опытах составляли около $2.5, 4.5$ и 8.8 МПа, при каждом уровне давления проводили три дублирующих опыта.

Скорость горения образца оценивали по его измеренной до опыта длине и времени горения, определяемому по сигналу от датчика давления в СВД в процессе горения. Давление газа в СВД контролировали образцовым манометром и тензометрическим датчиком давления типа ЛХ-412 и регистрировали с использованием АЦП L-Card E140 и ноутбука. Результаты представлены на рис. 1 и в табл. 2.

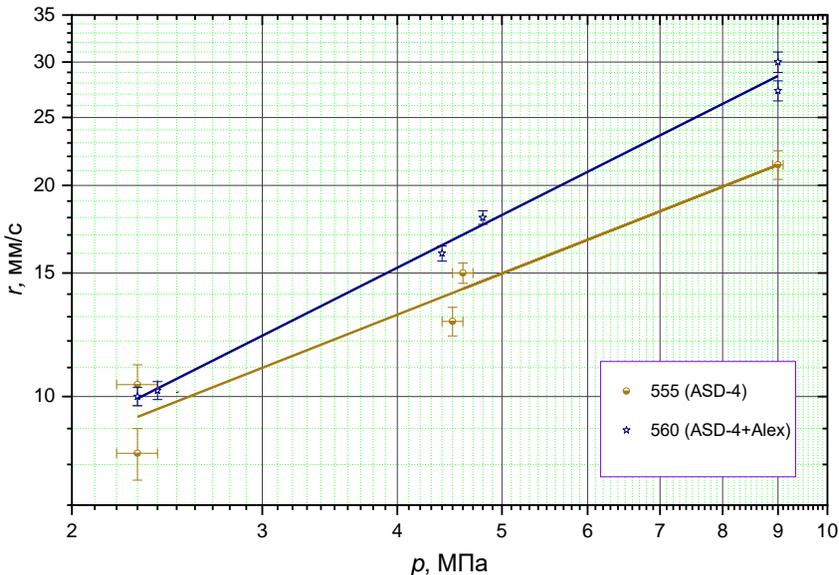


Рис. 1. Экспериментальные зависимости скорости горения от давления
Fig. 1. Experimental burning rates as functions of pressure

Таблица 2

Экспериментальные данные по скоростям горения в диапазоне давлений 2.3–9 МПа

Топливо	Горючее	Параметры аппроксимации вида $r = Vr^n$		R ²	Значения скорости горения (мм/с) при трех характерных давлениях (МПа), вычисленные по аппроксимирующим зависимостям		
		<i>B</i>	<i>n</i>		r@2	r@4	r@8
555	АСД-4	5.6 ± 1.0	0.6 ± 0.1	0.96	8.6	13.1	19.9
560	АСД-4 + Alex мод	5.2 ± 0.8	0.8 ± 0.1	0.98	8.9	15.3	26.1

Дисперсный анализ металлического горючего

В табл. 3 приведены средние размеры частиц D_{mn} , основанные на моментах дифференциальной функции распределения частиц по размерам, и указаны методы гранулометрического анализа. Определение и свойства средних D_{mn} см.: [3, 4].

Таблица 3

Средние размеры D_{mn} (мкм) порошкообразных компонентов топлив и метод анализа

Компоненты	D_{10}	D_{30}	D_{32}	D_{43}	Методы
Alex	1.1	1.9	3.9	15.1	BCou
АСД-4	4.6	5.7	7.1	8.9	Mlv
АСД-4 + Alex	1.4	2.8	5.6	10.9	Calc
ПХА < 50 мкм	3.3	8.6	24.7	42.9	Mlv
ПХА 160–315	286	299	312	323	Opt

Примечание. Обозначения методов гранулометрического анализа расшифрованы в тексте.

Для методов анализа приняты обозначения: Mlv – автоматический гранулометр Малверн 3600E. Режим работы прибора: максимальное разрешение (16 размерных интервалов в диапазоне 0.5–118 мкм), ультразвук до измерения в течение 30 с, механическая мешалка во время измерения включена, несущая жидкость – ацетон (за исключением порошка ПХА < 50 мкм ($S_{\text{свет}} = 5\,400\text{ см}^2/\text{г}$), который анализировали в гексане). Каждую пробу анализировали дважды с интервалом 3 мин, результаты усредняли. BCou – лазерный анализатор частиц Beckman Coulter LS 13 320. Далее обозначения Mlv и BCou будут использоваться для указания соответствующих приборов-гранулометров. Режим работы прибора BCou: максимальное разрешение (116 размерных интервалов в диапазоне 0.04–2 000 мкм), ультразвук до измерения в течение 30 с, несущая жидкость – ацетон. Заданная математическая модель обработки – оксид алюминия. Поскольку анализатор BCou – проточный, повторение и усреднение измерений не проводили. Opt – оптический проекционный микроскоп Carl Zeiss Pictoval с полуавтоматическим 23-канальным счетным устройством (ПСУ) [9] был использован для анализа порошка ПХА фракции 160–315 мкм. Calc – для смеси (АСД-4 + Alex) приведены расчетные значения, вычисленные с учетом распределений и массовых долей АСД-4 и Alex. Отметим, что порошок Alex в процессе гранулометрического анализа, по-видимому, находится в агрегированном состоянии, поскольку его средний размер D_{43} больше, чем у АСД-4.

Химический анализ металлического горючего

В табл. 4 представлены результаты химического анализа металлического горючего (МГ) в виде значения измеренного восстановительного числа RN_{mf} . Восстановительное число RN количественно характеризует способность материала присоединять кислород. Для исходного МГ это потенциальная способность материала к окислению. Для продуктов горения восстановительное число характеризует количество еще неокисленного, т.е. активного, материала. Отношение RN после горения (для КПП) и RN до горения (для МГ) служит мерой неполноты сгорания МГ. В табл. 4 также приведено теоретическое восстановительное число для металлического горючего RN_{mft} , которое вычисляется по стехиометрии реакции окисления. Отношение (RN_{mf}/RN_{mft}) измеренного и теоретического значений характеризует «начальную окисленность» МГ, т.е. его деградацию в процессе хранения. Для Al отношение RN_{mf}/RN_{mft} можно выразить в процентах и интерпретировать как процентное содержание металлического неокисленного Al в МГ.

Таблица 4

Восстановительное число и удельная теплота сгорания металлических горючих

Горючее	Топливо	RN_{mf} (измерено)	RN_{mft} (расчет)
АСД-4	555	10.2 ± 0.3 (% Al 92.1 ± 1.8)	11.1
Alex	–	8.8 ± 0.2 (% Al 78.8 ± 1.8)	11.1
АСД-4 + Alex	560	9.8 (аддитивный расчет)	11.1

Восстановительное число определяется в результате прямого химического анализа цериметрическим методом [6]. Справочное значение удельной теплоты сгорания металлического горючего Q 30.98 кДж/г [10].

Гранулометрический анализ КПП

Гранулометрический анализ КПП проводили с использованием сит с ячейкой 120 и 250 мкм, выделяя фракции мельче 120 и 120–250 мкм. По своим морфологическим характеристикам частицы КПП топлив 555 и 560 относятся к типам «попкорн» (PopC) и «сферы» (S). Описание и типичные фотографии этих типов частиц даны в [7]. Вкратце, тип PopC – разрушившиеся агломераты, тип S – классические алюминиевые агломераты и оксидные частицы. Основное содержание фракций КПП обоих топлив – частицы типа PopC. В случае топлива 555 количество неразрушенных сферических частиц во фракции 120–250 мкм было крайне мало, поэтому их гранулометрический анализ не проводили, а фракцию 120–250 мкм учитывали по массе. Относительное количество сферических частиц во всех фракциях КПП топлива 560 больше, что позволило провести гранулометрический анализ частиц типа S во фракции 120–250 мкм методом Opt. Погрешность определения размеров частиц соответствует половине ширины гистограммного интервала и типично составляет ± 8.5 мкм. В КПП фракции < 120 мкм также имеются различные белые сферы (рис. 2), однако выделить их из основной массы КПП не представляется возможным. Поэтому их распределение по размерам «спрятано» в распределении фракции < 120 мкм, которую анализировали на гранулометре Mlv. Отметим факт наличия в КПП едкой жидкости с резким кислотным запа-

хом. Ее количество увеличивается с давлением для обоих топлив 555 и 560, и относительно больше у топлива 560. Капли, попавшие на фильтр, могут вызывать его локальные повреждения. Степень «целостности» фильтра в процентах оценена кортежами чисел: 100, 100, 90% для топлива 555 и 98, 95, 80% для топлива 560. Последовательность чисел в кортеже соответствует уровням давления 2, 4 и 8 МПа, и 100% означает безукоризненно целый фильтр.

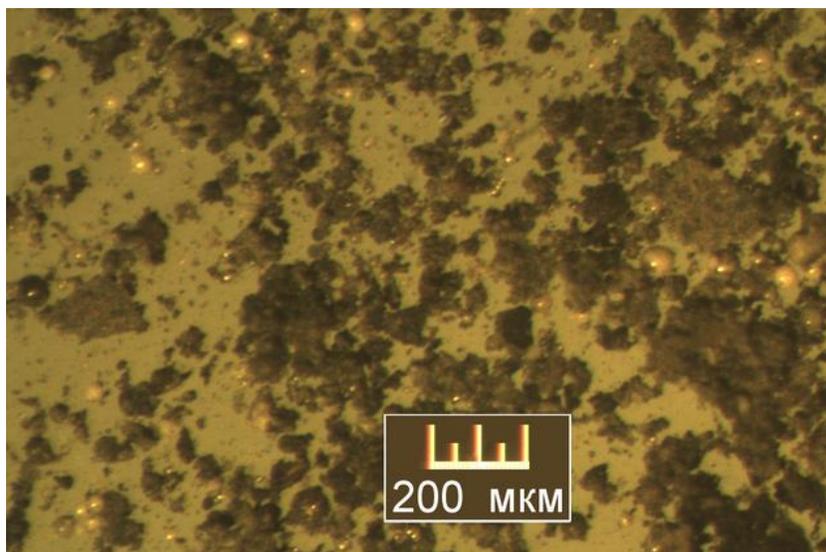


Рис. 2. Фракция частиц КПП мельче 120 мкм для топлива 560 при давлении 8.9 МПа. Иллюстрация наличия белых оксидных сфер
Fig. 2. Fraction of SSP particles smaller than 120 microns for propellant 560 at a pressure of 8.9 MPa. Illustration of the presence of white oxide spheres

Рассмотрим гранулометрические характеристики КПП. Как и в других наших работах [2, 3, 7], результаты гранулометрического частиц представлены графически в виде гистограммы $g(D)$ плотности распределения относительной массы частиц КПП по размерам, которую определяли следующим образом:

$$g_i(D) = m_i / (M_{prop} \Delta D_i),$$

где D – размер (диаметр) частиц, m_i – масса частиц в i -м гистограммном интервале, M_{prop} – масса топлива (суммарная величина для серии образцов, сжигаемых в одинаковых условиях), ΔD_i – ширина i -го гистограммного интервала. В линейных координатах площадь (произведение ширины на высоту) каждого гистограммного интервала пропорциональна массе, а общая площадь под кривой соответствует суммарной массе КПП.

Количеством массовые функции распределения частиц по размерам характеризовали набором средних диаметров D_{10} , D_{30} , D_{32} , D_{43} , D_{53} , основанных на моментах дифференциальной функции распределения. Средний D_{53} был введен в [11] при решении задачи об осаждении k -фазы в канале сложной геометрической формы.

На рис. 3 и 4 представлены массовые функции распределения частиц КПП топлив 555 и 560 при вариации давления, а также использованного в этих топливах металлического горючего АСД-4 и смеси (АСД-4 + Alex). В обозначениях кри-

вых для КПП содержится информация о топливе, металлическом горючем и давлении при проведении экспериментов с отбором КПП. Так, например, обозначение 555(ASD-4)23 означает: топливо 555, горючее ASD-4, отбор при давлении 23 атм. Для исходного МГ в обозначении кривой использованы буквы *ini*, например, кривая ASD-4ini – массовое распределение горючего ASD-4. Графики приведены в линейной и полулогарифмической системах координат. В линейных координатах площадь (произведение ширины на высоту) каждого гистограммного интервала пропорциональна массе, а общая площадь под кривой соответствует суммарной массе КПП. В случае исходного горючего площадь под кривой равна 0.157 и соответствует массовой доле МГ в топливе. Сопоставление графиков для исходного МГ и КПП позволяет оценить прирост массы за счет окисления МГ и перераспределение массы в результате горения. Полулогарифмическое представление позволяет лучше рассмотреть график массового распределения в области малых размеров частиц. В табл. 5–7 представлены средние размеры частиц, в том числе в табл. 7 для сферических частиц КПП топлива 560. В табл. 8 для трех уровней давления p приведены основные параметры, характеризующие горение и КПП топлив 555 и 560, такие как скорость горения r , неполнота сгорания η , средний размер D_{43} , безразмерная масса КПП m_{csp} , отношение реально собранной массы КПП к ее теоретическому значению $CCP/CCPt$, а также эффективность энергосыделения E .

Приведем определения параметров (как в [7]):

$m_{mf} \equiv mf$ – безразмерная масса металлического горючего в топливе, совпадает с массовой долей МГ в топливе mf . Во всех случаях обезразмеривание производится путем деления на массу топлива.

$m_{csp} \equiv CCP$ – безразмерная масса КПП. CCP – альтернативное обозначение, используемое наравне с m_{csp} .

m_{120} – безразмерная масса КПП во фракции частиц крупнее 120 мкм. Эта фракция выделяется на сите с размером ячейки 120 мкм и обозначается как фракция 120–250 мкм, даже если сито 250 мкм реально не использовалось, а правая граница фракции назначена 250 мкм для единообразия.

$CCPt$ – общая безразмерная теоретическая масса КПП. Рассчитывается в предположении полного превращения активного алюминия в МГ в высший оксид $Al \rightarrow Al_2O_3$ в соответствии со стехиометрическим коэффициентом 102/54.

$CCP/CCPt$ – отношение реально собранной массы КПП к ее теоретическому значению.

RN – восстановительное число, которое определяется методом цериметрического анализа [12].

RN_{mf} – восстановительное число для металлического горючего. В случае смешанного горючего вычисляется посредством аддитивного расчета по RN компонентов (см. табл. 3).

RN_{prop} – восстановительное число для топлива. Вычисляется с использованием восстановительного числа RN_{mf} для МГ и доли МГ в топливе: $RN_{prop} = RN_{mf}m_{mf}$.

RN_{csp} – восстановительное число для КПП, определяется в результате химанализа как $RN_{csp} = (RN \text{ для частиц КПП})m_{csp}$.

Если фракций КПП несколько, то формула имеет вид суммы по фракциям:

$$RN_{csp} = \sum (RN \text{ для частиц КПП } i\text{-й фракции})m_{cspi},$$

где m_{cspi} – безразмерная масса i -й фракции КПП.

Зная значение восстановительного числа RN_{mf} для горючего, входящего в состав топлива до горения, и значение $RN_{ссп}$ для КПГ после горения, определим неполноту сгорания: $\eta = RN_{ссп}/RN_{prop}$.

При таком определении неполнота сгорания изменяется от 1 до 0, где 1 – ничего не сгорело, 0 – все сгорело.

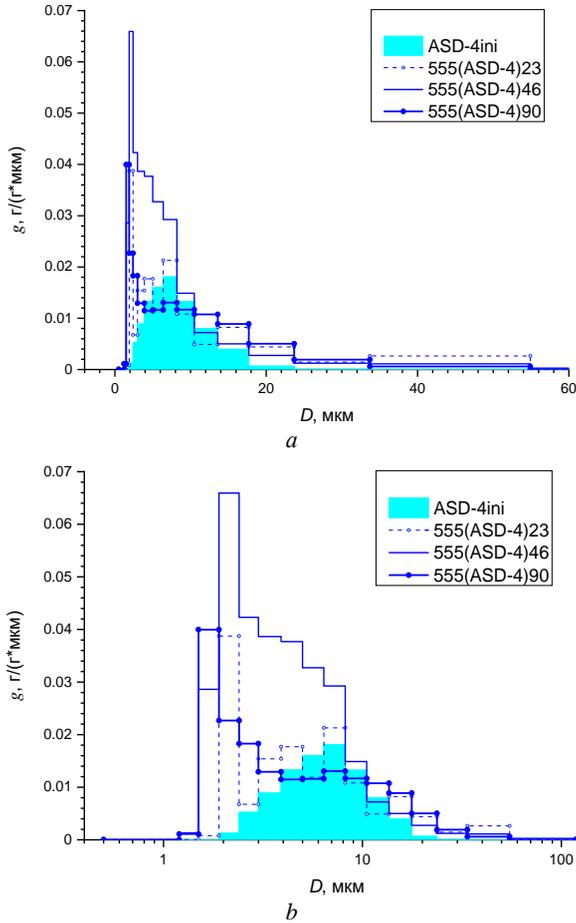


Рис. 3. Массовые распределения частиц КПГ топлива 555 и исходного алюминия АСД-4 в топливе 555 в линейной (а) и полулогарифмической системах координат (b)

Fig. 3. Mass distributions of CCP particles of propellant 555 and initial aluminum ASD-4 in propellant 555 in (a) linear and (b) semi-logarithmic coordinate system

Таблица 5

Средние размеры D_{mn} (мкм) частиц КПГ топлива 555 и МГ АСД-4

Давление (МПа)	D_{10}	D_{30}	D_{32}	D_{43}	D_{53}
2.3	2.9	4.6	7.9	19.7	31.2
4.6	2.2	3.2	5.0	13.1	23.9
9.0	2.3	3.6	6.4	16.5	29.8
Горючее АСД-4	4.6	5.7	7.1	8.9	9.8

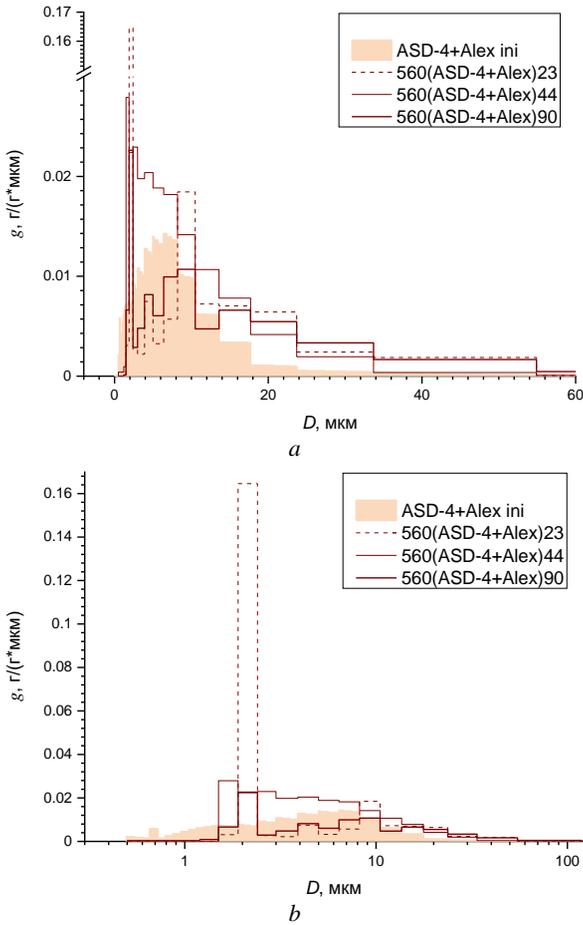


Рис. 4. Массовые распределения частиц КПП топлива 560 и исходного МГ в топливе 560 в линейной (а) и полулогарифмической системе координат (b)

Fig. 4. Mass distributions of CCP particles of propellant 560 and initial aluminum particles in propellant 560 in (a) linear and (b) semilogarithmic coordinate system

Таблица 6

Средние размеры D_{mn} (мкм) частиц КПП топлива 560 и МГ

Давление (МПа)	D_{10}	D_{30}	D_{32}	D_{43}	D_{53}
2.3	2.3	3.3	5.6	18.2	30.2
4.4	2.4	3.7	6.2	13.7	23.0
9.0	2.7	4.9	10.6	28.6	41.0
Горючее АСД-4+Alex	1.4	2.8	5.6	10.9	15.5

Эффективность энергосвободения – интегральный параметр, определяемый по формуле

$$E = (1 - \eta)m_{mf}(RN_{mf}/RN_{mfi})Q,$$

где множитель (RN_{mf}/RN_{mfi}) характеризует «начальную окисленность» металлического горючего, Q – удельная теплота сгорания горючего в кДж/г. Параметр E

имеет размерность кДж/г и характеризует количество теплоты, выделившееся при сгорании 1 г топлива в условиях эксперимента. В данной работе гашение частиц дисперсной фазы проводили вблизи поверхности горения, поэтому параметр E характеризует выделение теплоты вблизи поверхности горения, которое существенно для скорости горения.

Анализ графиков функций распределения (ФР) и величин средних размеров для топлива 555 показывает следующее:

- Масса КПП намного превышает массу МГ. При этом прирост массы обеспечивается частицами с размерами в диапазоне 1.2–10.5 мкм, т.е. в диапазоне, характерном для оксидных частиц, образующихся при горении алюминия как по механизму парофазного горения, так и по механизму образования финальных оксидных частиц, образующихся при полном выгорании из частицы активного алюминия [13]. Здесь и далее границы приводимых диапазонов размеров соответствуют гистограммным интервалам гранулометра Mlv. Судя по размерам оксидных частиц, существенная доля алюминия выходит в газовую фазу в исходном виде (не в составе агломератов). Вместе с тем агломерация алюминия, очевидно, имеет место, что проявляется в увеличении массы КПП в диапазоне 8.2–54.9 мкм по сравнению с массой исходного МГ и проявляется в увеличении средних размеров высоких порядков. Так, например, средний размер D_{43} в большинстве случаев увеличивается с ~ 9 до 13–20 мкм, средний D_{53} увеличивается с ~ 10 до 24–31 мкм. При этом монотонного изменения средних размеров при вариации давления не замечено.

Результаты проведенного анализа данных для топлива 555 свидетельствуют: (1) о слабой, но заметной агломерации алюминия; (2) об образовании существенного количества (и массы) оксидных частиц в диапазоне 1.2–10.5 мкм по двум известным механизмам; (3) о слабом влиянии давления на указанные процессы и характеристики.

Аналогичный анализ для топлива 560 показывает следующее:

- ФР частиц исходного материала, кривая (ASD-4 + Alex ini), имеет «хвост», простирающийся до 111 мкм, в то время ФР для порошка АСД-4 заканчивается на размере 33.7 мкм. Предположительно, это обусловлено ФР порошка Alex и связано с агрегацией его частиц. Соответственно, МГ (АСД-4 + Alex) характеризуется довольно большими величинами средних размеров высоких порядков, обусловленными наличием крупных частиц. Так, например, у (АСД-4 + Alex) средний $D_{43} = 10.9$ мкм, для сравнения: у АСД-4 $D_{43} = 8.9$ мкм, а у Alex $D_{43} = 15.1$ мкм. По-видимому, это означает, что исходные частицы Alex агрегированы. Часть агрегатов не разрушается при перемешивании топливной массы в процессе приготовления состава, и это приводит к образованию сравнительно крупных сферических частиц-агломератов. На рис. 5 и в табл. 8 представлены данные о сферических частицах КПП крупнее 120 мкм. Предполагается, что за эти частицы КПП ответственны именно крупные агломераты, появившиеся при введении в МГ порошка Alex.

- В ФР КПП при всех давлениях очень мало частиц в интервале 1.2–1.5 мкм, а частицы мельче 1.2 мкм вообще отсутствуют, в то время как у исходного МГ соответствующие частицы имеются. Присутствие мелких частиц вплоть до 0.4 мкм в исходном МГ обеспечивается вкладом порошка Alex. Можно предполагать, что частицы исходного МГ с размерами от 0.4 до 1.5 мкм или агломерируют, или

присоединяются к более крупным частицам. Иными словами, такие частицы не выходят в газовую фазу в своем первоначальном виде. Поэтому в ФР КПП отсутствуют оксидные частицы соответствующего размера. Вместе с тем в КПП имеется мода большой амплитуды в интервале 1.9–2.4 мкм. Согласно результатам [14] имеются следующие соотношения между размером частицы алюминия D_{Al} и размером частицы оксида D_{ox} , образованного при полном при полном сгорании алюминиевой частицы: $D_{ox} = 0.55D_{Al}$, или $D_{Al} = 1.8D_{ox}$. Соответственно, частицы оксида 1.9–2.4 мкм могут быть образованы из частиц алюминия с размерами 3.4–4.3 мкм. Этот интервал не совпадает ни с основной модой порошка Alex (1.5–1.7 мкм), ни с основной модой порошка АСД-4 (6.4–8.2 мкм). Поэтому можно предположить, что частицы с размерами в интервале 3.2–4.1 мкм и есть «мелкие агломераты», образованные в результате слияния частиц исходного МГ с размерами от 0.4 до 1.5 мкм, а также частицы оксида, образованные при сгорании частиц с размерами 3.4–4.3 мкм. Здесь мы вводим понятие «мелких агломератов» как частиц, имеющих агломерационное происхождение, но при этом микронные размеры (в отличие от традиционных агломератов, которые обычно имеют размеры более 40–60 мкм). Следует заметить, что при увеличении давления амплитуда моды 1.9–2.4 мкм уменьшается. Возможно, это связано с уменьшением вклада «мелких агломератов» и увеличением вклада «традиционных агломератов».

• В ФР КПП при всех давлениях масса частиц в диапазоне размеров 8.2–54.9 мкм заметно превышает массу исходного горючего в этом диапазоне. Это значит, что при горении топлива 560 также имеет место агломерация металлического горючего в традиционном понимании, т.е. с образованием частиц-агломератов крупнее 30–40 мкм. Представляет интерес сравнить размеры частиц КПП топлив 555 и 560 с учетом влияния частичной замены АСД-4 на Alex. Можно видеть, что средние размеры D_{43} КПП топлив 555 и 560 сопоставимы, за исключением случая давления около 9 МПа. В этом случае топливо 560 демонстрирует более сильную агломерацию, $D_{43} = 28.6$ мкм для топлива 560 и $D_{43} = 16.5$ мкм для топлива 555. Конечно, указанный факт опосредован процедурой выделения фракции КПП 120–250 мкм, вклад которой может давать заметный разброс в средних размерах высоких порядков. Тем не менее само наличие сравнительно крупных сферических частиц крупнее 120 мкм в КПП топлива 560 заставляет сделать вывод, что введение Alex не приводит к снижению агломерации, несмотря на увеличение скорости горения (см. рис. 1). Гранулометрические характеристики сферических частиц КПП крупнее 120 мкм представляют интерес с точки зрения развития моделей агломерации, поскольку в совокупности с данными о скоростях горения дают базовую информацию для разработки моделей. Массовые функции распределения сферических частиц КПП крупнее 120 мкм при трех уровнях давления представлены на рис. 5 и в табл. 8. Измерения частиц проведены методом Орт, типичная погрешность определения размеров частиц составляет ± 8.5 мкм. В обозначениях кривых на рис. 5 содержится информация о топливе и давлении, буква S стоит для напоминания о том, что это именно сферические частицы. Например, подпись кривой t560S44 означает: топливо 560, сферические частицы крупнее 120 мкм, давление 44 атм. В табл. 7 приведены средние размеры сферических частиц во фракции > 120 мкм и значения m_{120} . Следует отметить, что измеренные частицы «условно круглые», так что сравнение их размеров не совсем корректно. Частицы, отобранные при давлении 4.4 МПа, по-видимому,

трансформировались при хранении («распухли» в процессе перехода $S \rightarrow \text{PorC}$), отсюда появление особо крупных частиц и частичная потеря массы фракции (за счет прохода через сито 120 мкм). Отметим двухмодовый характер распределения в случае давления 9 МПа. Мода в районе 100 мкм может быть образована крупными финальными частицами оксида, образованными при полном сгорании агломератов с размером около 170 мкм.

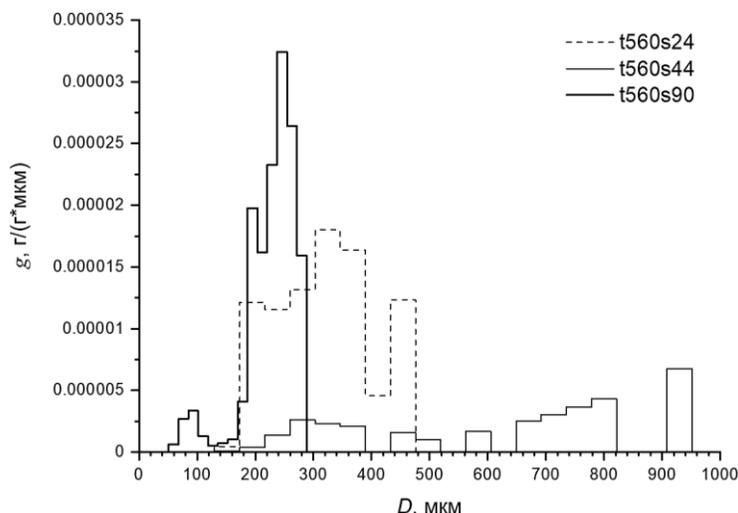


Рис. 5. Массовые распределения сферических частиц КПГ топлива 560 при вариации давления

Fig. 5. Mass distributions of spherical CCP particles for propellant 560 under pressure variations

Таблица 7

Средние размеры D_{mn} (мкм) сферических частиц во фракции крупнее 120 мкм в КПГ топлива 560 и безразмерная масса этой фракции

Давление (МПа)	D_{10}	D_{20}	D_{30}	D_{21}	D_{32}	D_{43}	D_{53}	m_{120}
2.4	255	264	274	274	296	319	329	0.00383
4.4	331	369	414	410	521	636	678	0.00144
9.0	145	164	178	184	212	228	232	0.00251

Таблица 8

Основные характеристики горения топлив 555 и 560

Топливо	Горючее	p , МПа	D_{43} , мкм	r , мм/с	η	$m_{ср}$	$CCP/CCPt$	E
555	АСД-4	2.3	19.7	9.4 ± 0.7	0.23 ± 0.02	0.29 ± 0.02	1.00 ± 0.02	3.5 ± 0.2
555	АСД-4	4.6	13.1	13.9 ± 0.6	0.28 ± 0.04	0.29 ± 0.04	1.02 ± 0.04	3.2 ± 0.1
555	АСД-4	9.0	16.5	21.4 ± 1.0	0.11 ± 0.04	0.27 ± 0.04	0.94 ± 0.04	4.0 ± 0.4
560	АСД-4 + Alex	2.4	18.2	10.1 ± 0.3	0.23 ± 0.01	0.31 ± 0.02	1.12 ± 0.02	3.3 ± 0.3
560	АСД-4 + Alex	4.4	13.7	17.0 ± 0.4	0.21 ± 0.05	0.29 ± 0.02	1.05 ± 0.02	3.4 ± 0.1
560	АСД-4 + Alex	8.9	28.6	28.7 ± 1.0	0.11 ± 0.01	0.26 ± 0.02	0.91 ± 0.02	3.8 ± 0.3

Анализируя данные табл. 8 заметим, что, несмотря на повышение скорости горения при частичной замене АСД-4 на Alex в топливе 560, поведение параметров η , $m_{ср}$, $CCP/CCPt$ и E для топлив 555 и 560 мало отличается (практически в пределах погрешности, за исключением величины η на уровне давления около 9 МПа). Имеет место снижение неполноты сгорания при давлении около 9 МПа по сравнению с давлениями около 2 и 4 МПа, при этом средние размеры D_{43} демонстрируют обратную тенденцию. А именно, при давлениях около 2 и 4 МПа средние D_{43} выше у топлива 555 в 1.1–1.7 раза, а при давлении около 9 МПа выше у топлива 560 в 1.7 раза. Наблюдаются близкие значения параметров $m_{ср}$ и $CCP/CCPt$ для обоих топлив при всех давлениях. Параметр E для обоих топлив несколько выше при давлении около 9 МПа, что обусловлено снижением неполноты сгорания η при высоком давлении. В целом в случае топлива 560 эффективность энергоснабжения ниже, что связано с изначально меньшей теплотворной способностью горючего из-за большей начальной окисленности металла. А именно, значение RN_{mf} для горючего АСД-4+Alex в 1.05 раза меньше, чем для АСД-4 (см. табл. 4). Примерно так же соотносятся между собой величины параметра E .

Горение при атмосферном давлении

Дополним приведенную информацию данными, полученными при атмосферном давлении. Горение аналогичных образцов (диаметр 1 см, бронировка Solprene) осуществляли в воздухе в комнатных условиях и проводили видеосъемку со скоростью 24 кадра в секунду. Ось образца располагали вертикально, факел образца был направлен вверх. Регистрировали время горения и параметры факела пламени. По измеренной до опыта длине образца и измеренному по видеозаписям времени горения вычисляли среднюю скорость горения. В табл. 9 приведены скорости горения, высота факела и качественные особенности горения. В качестве высоты факела принимали наибольшее значение, на которое поднималось пламя в течение всего времени горения образца. На рис. 6 показана фотография факела образца топлива 555. Факел топлива 560 имеет несколько большую высоту (см. табл. 9), но выглядит аналогично и потому не приводится.

Таблица 9

Параметры горения в воздухе при 1 атм

Топливо	Горючее	Скорость горения, мм/с	Высота факела, см	Особенности
555	15.7% АСД-4	0.6 ± 0.1	$(11.7-15.0) \pm 0.5$	Пульсации
560	10.7% АСД-4 + 5% Alex	0.6 ± 0.1	$(19.5-25.5) \pm 0.5$	Пульсации Погасание

Горение топлив 555 и 560 протекает с образованием яркого белого пламени с большим выходом светящихся частиц. Некоторые треки имеют излом, свидетельствующий о резком изменении направления движения горячей частицы. Подобные аномалии движения связаны с асимметрией процесса горения, которая развивается вследствие увеличения оксидного колпачка, покрывающего часть поверхности частицы [15]. Пока колпачок невелик, картина горения частицы

практически симметрична. Когда колпачок становится достаточно большим, начинается стадия асимметричного горения. Пламя вокруг частицы приобретает асимметричную форму, выбросы струй из-под колпачка приводят к излому траектории и / или вращению частицы.



Рис. 6. Горение топлива 555 в комнатных условиях (воздух, 1 атм)

Fig. 6. Combustion flame of propellant 555 under room conditions (air, 1 atm)

При горении топлив 555 и 560 также наблюдается *фрагментация* вылетевших с поверхности частиц, которая может происходить как в режиме «звездообразного взрыва», так и в режиме «еловой ветви». Треки фрагментирующих с разрывом частиц алюминия зачастую по форме напоминают кипселы (семена) одуванчика с парашютиком. Процесс горения топлив 555 и 560 сопровождается пульсацией пламени и периодическим изменением его яркости. В случае топлива 560 наблюдалось даже погасание образца.

Заключение

Частичная замена АСД-4 на Alex в топливе 560 по сравнению с топливом 555 приводит к увеличению скорости горения в 1.1–1.3 раза. Вместе с тем агломерационные параметры топлива 560 с горючим АСД-4 + Alex *не улучшаются*. Значения параметров $m_{ср}$, $ССР/ССРt$ и η для обоих топлив при всех давлениях попарно близки, средние размеры D_{43} ведут себя по-разному при вариации давления.

На уровнях давления 2 и 4 МПа топливо 560 имеет в 1.1–1.7 раза меньший размер D_{43} , чем топливо 555 (положительный эффект введения Alex), однако при давлении около 9 МПа картина меняется, и теперь уже топливо 555 имеет в 1.7 раза меньший D_{43} , чем топливо 560. Некоторые эмпирические факторы свидетельствуют, что при повышении давления изменяются пути реакций. В частности, в продуктах горения увеличивается количество кислотных продуктов, а также уменьшается неполнота сгорания металла η . Это приводит к увеличению эффективности энергосыделения E при давлении около 9 МПа для обоих топлив, однако топливо 560 уступает по этому параметру топливу 555 вследствие большей начальной окисленности порошка Alex в сравнении с АСД-4. Несмотря на негативное влияние добавки Alex на параметры агломерации в проведенных экспериментах, не следует торопиться с окончательным выводом о бесполезности Alex. Можно надеяться на его положительный эффект в случае обеспечения деконтактации частиц в топливной массе. Так, например, известны приемы обработки поверхности частиц бора, нацеленные на улучшение его «расходимости» в связующем на основе НТРВ [16]. Возможно, нечто подобное можно сделать с частицами алюминия. Поэтому исследования необходимо продолжить.

Полученный набор экспериментальных данных может быть использован для валидации разрабатываемых моделей горения алюминизированных топлив. При этом следует помнить о «неидеальности» реальных экспериментов. Опыт показывает, что образцы топлив, особенно содержащие такой «неудобный» в технологическом плане компонент, как высокодисперсный алюминиевый порошок Alex, могут иметь дефекты в форме каверн, непромесов, трещин и других неоднородностей, влияющих на скорость горения. Поэтому при валидации моделей следует стремиться воспроизвести не столько уровень скорости горения, сколько качественные закономерности поведения скорости горения топлив. Для рассматриваемых топлив такими качественными особенностями являются изменения характера реагирования (т.е. компонентов, путей и продуктов химических реакций) при увеличении давления, приводящие к повышению полноты сгорания металла и повышению скорости горения. Эффекты Alex'a для рассматриваемых топлив тривиальны и проявляются в увеличении скорости горения за счет более высокой удельной поверхности порошка и в снижении эффективности энергосыделения из-за начальной окисленности порошка. Представляется, что для топлив со слабой агломерацией модель должна уловить связь между начальными параметрами частиц порошка металла и скоростями реагирования и движения частиц в потоке газов, оттекающих от поверхности горения. Иерархия времен упомянутых процессов будет управлять реализацией тепловыделения на определенном расстоянии от поверхности горения, соответственно, управлять градиентом температуры и тепловым потоком из газовой фазы к поверхности топлива и в итоге скоростью газификации (она же скорость горения). Весьма полезны для валидации моделей критические эффекты горения, например погасание. Однако в настоящее время соответствующие экспериментальные данные крайне скудны.

Список источников

1. Иванов Н.Н., Иванов А.Н. Приборы и установки контактной диагностики и их использование в исследовании высокотемпературных двухфазных потоков // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 6. С. 87–101.

2. Глотов О.Г., Зарко В.Е., Карасев В.В. Проблемы и перспективы изучения агломерации и эволюции агломератов методом отборов // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 1. С. 161–172.
3. Глотов О.Г., Зырянов В.Я. Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. I. Методика исследования эволюции частиц дисперсной фазы // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 1. С. 74–80.
4. Korotkikh A.G., Glotov O.G., Arkhipov V.A., Zarko V.E., Kiskin A.B. Effect of iron and boron ultrafine powders on combustion of aluminized solid propellants // Combustion and Flame. 2017. V. 178. P. 195–204.
5. Петрянов И.В., Козлов В.И., Басманов П.И., Огородников Б.И. Волокнистые фильтрующие материалы ФП. М. : Знание, 1968. 78 с.
6. Pang W., De Luca L.T., Fan X., Glotov O.G., Zhao F. Boron-Based Fuel-Rich Propellant: Properties, Combustion, and Technology Aspects. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019. 323 p.
7. Glotov O.G., Poryazov V.A., Surodin G.S., Sorokin I.V., Krainov D.A. Combustion features of boron-based composite solid propellants // Acta Astronaut. 2022. V. 204. P. 11–24. doi: 10.1016/j.actaastro.2022.12.024 2023.
8. Попок В.Н., Вандель А.П., Колесников А.Ю. Исследование горения перхлоратных металлизированных композиций, содержащих соли динитраида // Бутлеровские сообщения. 2013. Т. 36, № 11. С. 58–66.
9. Куценозий К.П. Изучение физико-химических характеристик мощного аэрозольного облака : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1970. 144 с.
10. Теплотворная способность горючих материалов // Studme.org. 2021. URL: https://studme.org/35536/tovarovedenie/teplotvornaya_sposobnost_goryuchih_materialov (дата обращения: 22.04.2024).
11. Бобрышев В.П., Лисица В.Д., Спиридонов Ф.Ф. Двухфракционная модель слабонервновесного двухфазного течения. Качественная теория коагуляции и осаждения *k*-фазы // Макроскопическая кинетика, химическая и магнитная газодинамика : тез. докл. всесоюз. школы-семинара. Томск–Красноярск : Изд-во Том. ун-та, 1991. Т. 1. С. 11–12.
12. Fedotova T.D., Glotov O.G., Zarko V.E. Application of Cerimetric Methods for Determining the Metallic Aluminum Content in Ultrafine Aluminum Powders // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2007. V. 32 (2). P. 160–164.
13. Zarko V.E., Glotov O.G. Formation of Al oxide particles in combustion of aluminized condensed systems (Review) // Science and Technology of Energetic Materials. 2013. V. 74 (6). P. 139–143.
14. Глотов О.Г., Белоусова Н.С., Сурудин Г.С. Горение крупных частиц-агломератов алюминия в воздухе. I. Методика исследования, времена горения и характеристики финальных оксидных частиц // Физика горения и взрыва. 2025. Т. 61. (В печати).
15. Dreizin E.L. On the Mechanism of Asymmetric Aluminum Particle Combustion // Combust. Flame. 1999. V. 117. P. 841–850.
16. Jiang Y., Yilmaz N.E.D., Barker K.P., Baek J., Xia Y., Zheng X. Enhancing Mechanical and Combustion Performance of Boron/Polymer Composites via Boron Particle Functionalization // ACS Applied Materials and Interfaces. 2021. V. 13 (24). P. 28908–28915. doi: 10.1021/acsami.1c06727.

References

1. Ivanov N.N., Ivanov A.N. (1991) Instruments and apparatus for contacting diagnostics and their application in the investigation of high-temperature two-phase flows. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 27(6). pp. 729–741.

2. Glotov O.G., Zarko V.E., Karasev V.V. (2000) Problems and prospects of investigating the formation and evolution of agglomerates by the sampling method. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 36(1). pp. 146–156.
3. Glotov O.G., Zyryanov V.Ya. (1995) Condensed combustion products of aluminized propellants. I. A technique for investigating the evolution of disperse-phase particles. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 31(1). pp. 72–78.
4. Korotkikh A.G., Glotov O.G., Arkhipov V.A., Zarko V.E., Kiskin A.B. (2017) Effect of iron and boron ultrafine powders on combustion of aluminized solid propellants. *Combustion and Flame*. 178. pp. 195–204.
5. Petryanov I.V., Kozlov V.I., Basmanov P.I., Ogorodnikov B.I. (1968) *Voloknistyye fil'truyushchiye materialy FP* [Fibrous filtering materials FP]. Moscow: Znanie.
6. Pang W., De Luca L.T., Fan X., Glotov O.G., Zhao F. (2019) *Boron-Based Fuel-Rich Propellant: Properties, Combustion, and Technology Aspects*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
7. Glotov O.G., Poryazov V.A., Surodin G.S., Sorokin I.V., Krainov D.A. (2022) Combustion features of boron-based composite solid propellants. *Acta Astronautica*. 204. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.12.024 2023.
8. Popok V.N., Vandel' A.P., Kolesnikov A.Yu. (2013) Issledovaniye goreniya perkhloratnykh metallizirovannykh kompozitsiy, soderzhashchikh soli dinitramida [Investigation of the combustion of perchlorate metallized compositions containing dinitramide salts.]. *Butlerovskiyе soobshcheniya*. 36(11). pp. 58–66.
9. Kutsenogii K.P. (1970) *Izucheniyе fiziko-khimicheskikh kharakteristik moshchnogo aerazol'nogo oblaka* [Study of the physico-chemical characteristics of a powerful aerosol cloud]. Dissertation. Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.
10. Teplotvornaya sposobnost' goryuchikh materialov [Calorific value of combustible materials]. URL: https://studme.org/35536/tovarovedenie/teplotvornaya_sposobnost_goryuchih_materialov (date of application: 19.05.2024).
11. Bobryshev V.P., Lisitsa V.D., Spiridonov F.F. (1991) Dvukhfraztsionnaya model' slabone-ravnovesnogo dvukhfaznogo techeniya. Kachestvennaya teoriya koagulyatsii i osazhdeniya k-fazy [A two-fraction model of a weakly nonequilibrium two-phase flow. Qualitative theory of coagulation and condensed-phase deposition]. *Abstracts of the All-Union School-Seminar. Tomsk–Krasnoyarsk. Tomsk: Tomsk State University*. pp. 11–12.
12. Fedotova T.D., Glotov O.G., Zarko V.E. (2007) Application of cerimetric methods for determining the metallic aluminum content in ultrafine aluminum powders. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 32(2). pp. 160–164.
13. Zarko V.E., Glotov O.G. (2013) Formation of Al oxide particles in combustion of aluminized condensed systems (Review). *Science and Technology of Energetic Materials*. 74(6). pp. 139–143.
14. Glotov O.G., Belousova N.S., Surodin G.S. (2025) Combustion of large particles-agglomerates of aluminum in the air. I. Research methodology, burning times and characteristics of final oxide particles. *Combustion, Explosion, and Shock Waves* (in print).
15. Dreizin E.L. (1999) On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion. *Combustion and Flame*. 117. pp. 841–850.
16. Jiang Y., Yilmaz N.E.D., Barker K.P., Baek J., Xia Y., Zheng X. (2021) Enhancing mechanical and combustion performance of boron/polymer composites via boron particle functionalization. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 13(24). pp. 28908–28915. DOI: 10.1021/acsami.1c06727.

Сведения об авторах:

Порязов Василий Андреевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической физики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: poryazov@ftf.tsu.ru

Глотов Олег Григорьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения РАН (Новосибирск, Россия). E-mail: glotov@kinetics.nsc.ru

Крайнов Алексей Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математической физики физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: a.krainov@ftf.tsu.ru

Крайнов Дмитрий Алексеевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Томского политехнического университета (Томск, Россия). E-mail: kraynov@tpu.ru

Сорокин Иван Владимирович – кандидат физико-математических наук, ведущий специалист Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения РАН (Новосибирск, Россия). E-mail: sorokin@kinetics.nsc.ru

Суродин Григорий Сергеевич – специалист Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения РАН (Новосибирск, Россия). E-mail: surodin83@yandex.ru

Information about the authors:

Poryazov Vasily A. (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: poryazov@ftf.tsu.ru

Glotov Oleg G. (Candidate of Physics and Mathematics, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: glotov@kinetics.nsc.ru

Krainov Aleksey Yu. (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: a.krainov@ftf.tsu.ru

Krainov Dmitriy A. (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: kraynov@tpu.ru

Sorokin Ivan V. (Candidate of Physics and Mathematics, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: sorokin@kinetics.nsc.ru

Surodin Grigory S. (Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: surodin83@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 06.05.2024; принята к публикации 09.12.2024

The article was submitted 06.05.2024; accepted for publication 09.12.2024