

УДК 629.194.632.1:536.46

## ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ АЛЮМИНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ И НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

В. А. Архипов<sup>1,2</sup>, С. С. Бондарчук<sup>1,2</sup>, А. Г. Коротких<sup>3</sup>, В. Т. Кузнецов<sup>1</sup>,  
А. А. Громов<sup>3</sup>, С. А. Волков<sup>4</sup>, Л. Н. Ревягин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета, 634050 Томск  
leva@niipmm.tsu.ru

<sup>2</sup>Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, 659322 Бийск

<sup>3</sup>Томский политехнический университет, 634050 Томск, korotkikh@tpu.ru,

<sup>4</sup>Томский государственный университет, 634050 Томск

Представлены результаты исследования влияния дисперсности порошка алюминия в составе конденсированных систем на характеристики зажигания, нестационарного горения и на акустическую проводимость поверхности горения. Анализ экспериментальных данных показал, что задержка зажигания и температура поверхности горения исследуемых составов гетерогенных конденсированных систем уменьшаются при увеличении дисперсности порошка алюминия, а характер зависимости нестационарной скорости горения от времени сброса давления в камере сгорания для составов, содержащих микронный или ультрадисперсный порошок алюминия, качественно соответствует феноменологической теории нестационарного горения. Замена микронного порошка алюминия на ультрадисперсный в составе гетерогенной конденсированной системы увеличивает акустическую проводимость.

Ключевые слова: гетерогенные конденсированные системы, порошок алюминия, дисперсность частиц алюминия, кондуктивное зажигание, лучистый поток, нестационарное горение, акустическая проводимость.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений при создании нового поколения гетерогенных конденсированных систем (ГКС) является замена порошков алюминия микронных размеров (в частности, порошков промышленных марок АСД) на ультрадисперсные порошки (УДП), размеры частиц которых на порядки ниже. Первые экспериментальные исследования по использованию УДП алюминия в составе ГКС проводились в СССР (ИХФ АН СССР) в 1960–1970-е годы под руководством О. И. Лейпунского и М. Я. Гена [1, 2]. Частицы алюминия получали путем испарения и конденсации па-

ров алюминия в среде аргона. Размер образующихся частиц варьировался за счет изменения режимов испарения и конденсации. Были получены обнадеживающие результаты в плане повышения энергетических характеристик ГКС за счет более полного сгорания алюминия и уменьшения размеров частиц оксида алюминия в продуктах сгорания. Эти работы проводились в лабораторных условиях с использованием небольших образцов ГКС. В дальнейшем исследования были приостановлены по ряду причин, в первую очередь из-за отсутствия в то время технологий получения крупных партий УДП алюминия с химически стабильными частицами и из-за недостатка информации по физике горения и агломерации наноразмерных частиц в составе ГКС.

Активизация исследований по использованию УДП в составе ГКС [3–5] началась в конце 1990-х годов и длится по настоящее время. Обусловлено это следующими факторами.

— Традиционные композиции ГКС, содержащие микроразмерные порошки алюминия диаметром  $3 \div 20$  мкм, полностью исчерпали

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» по теме «Применение нанопорошков металлов в энергетических и керамических технологиях» (государственный контракт № 2011-1.9-519-001-020).

© Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Г.,  
Кузнецов В. Т., Громов А. А., Волков С. А.,  
Ревягин Л. Н., 2012.

свои потенциальные возможности, и в ближайшие годы принципиально новых результатов по повышению энергетических характеристик не предвидится.

— Достигнутый прогресс в технологии получения УДП (в частности, методом электрического взрыва проволочек [6]) позволяет получать достаточно крупные партии УДП металлов с контролируруемыми свойствами, распределением частиц по размерам и их высокой стабильностью.

— Исследования [7–12] показали, что применение УДП алюминия в составе ГКС перспективно не только в плане повышения энергетических характеристик, но и в плане снижения агломерации на поверхности горения образцов, увеличения скорости горения, регулирования показателя степени в законе скорости горения.

Анализ результатов исследований по стационарному горению ГКС, содержащих УДП алюминия, приведен в обзорных статьях [13, 14] и монографии [15]. В настоящей работе изложены результаты исследования нестационарных эффектов при кондуктивном и лучистом зажигании, горении при резком сбросе давления и гашении в камере сгорания, а также результаты изучения акустической проводимости горячей поверхности, которая характеризует склонность гетерогенных конденсированных систем к вибрационному горению.

### УЛЬТРАДИСПЕРСНЫЙ ПОРОШОК АЛЮМИНИЯ

Дисперсность частиц порошков является одной из важнейших характеристик рассматриваемых систем, определяющей их свойства и поведение в процессах зажигания, горения и гашения. В связи с интенсивным развитием порошковых нанотехнологий, механики многофазных потоков, методов диагностики актуальными становятся задачи адекватного описания спектра размеров полидисперсных систем, идентификации экспериментально полученных распределений частиц по размерам (как правило, гистограмм) и аппроксимации их подходящей функцией плотности вероятности.

Анализ литературных данных по гранулометрическому составу различных полидисперсных систем показал, что практически все порошки металлов с унимодальной (одновершинной) функцией распределения могут быть описаны с помощью обобщенно-

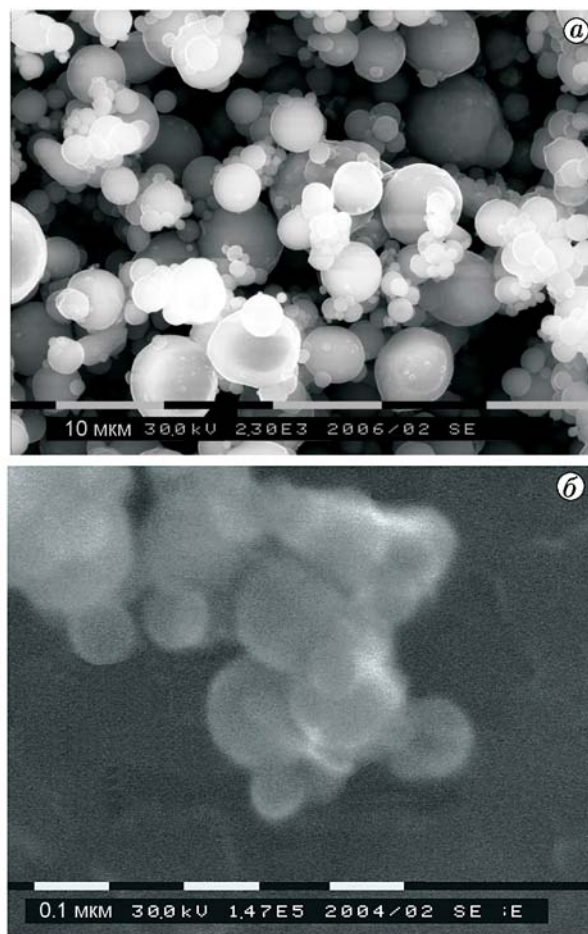


Рис. 1. Микрофотография микронного (АСД-4) (а) и ультрадисперсного (Alex) (б) порошков алюминия

го гамма-распределения или логарифмически-нормального распределения.

В работе [16] рассмотрен алгоритм идентификации унимодальных распределений частиц порошков алюминия по размерам с использованием экспериментальных гистограмм, основанный на постановке и решении обратной задачи, нахождении экстремума соответствующего функционала методом прямого поиска. Для апробации разработанного подхода выполнены исследования микронных порошков алюминия марок АСД-4 (рис. 1, а), АСД-6, АСД-8, широко используемых в современных составах ГКС, а также УДП алюминия Alex (рис. 1, б), полученного методом электрического взрыва проволочек в среде аргона. Функции массового и счетного распределений частиц исследуемых порошков приведены в табл. 1. На основе счетного распределения рассчитаны среднеста-

Таблица 1

Среднестатистические диаметры и функции распределения порошков алюминия

Марка порошка	$d_{10}$ , мкм	$d_{20}$ , мкм	$d_{30}$ , мкм	$d_{32}$ , мкм	$d_{43}$ , мкм	Функция распределения, мкм <sup>-1</sup>
АСД-4	1.23	1.66	2.28	4.34	7.34	$g(d) = 0.064d^{1.21} \exp(-0.303d)$
АСД-6	0.85	1.17	1.60	3.01	4.72	$g(d) = 0.147d^{1.64} \exp(-0.561d)$
АСД-8	0.72	0.90	1.09	1.60	2.11	$g(d) = 2.29d^{3.15} \exp(-1.97d)$
Alex	0.12	0.13	0.14	0.16	0.18	$f(d) = 28.7 \cdot 10^6 d^{4.49} \exp(-46.8d)$

Примечание.  $d_{10}$ ,  $d_{20}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{32}$ ,  $d_{43}$  — среднесчетный, среднеквадратичный, среднеобъемный, средний объемно-поверхностный и среднемассовый диаметры;  $g(d)$ ,  $f(d)$  — массовая и счетная функции распределения.

Таблица 2

Параметры активности порошков алюминия

Марка порошка	$T_{ox}$ , °C	$\alpha$ , % (660 °C)	$\alpha$ , % (1000 °C)	$v_{ox}$ , мг/с (при $T$ , °C)	$C_{Al}$ , %	$\delta$ , нм	$\rho_b$ , г/см <sup>3</sup>
АСД-4	820	2.5	41.8	0.05 (970 ÷ 980)	98.7	10.8	1.06
Alex	548	39.4	45.0	0.05 (541 ÷ 554)	86.0	3.1	0.15

Примечание.  $T_{ox}$  — температура интенсивного окисления,  $\alpha$  — степень окисления,  $v_{ox}$  — максимальная скорость окисления,  $C_{Al}$  — массовое содержание алюминия,  $\delta$  — расчетная толщина оксидного слоя  $Al_2O_3$ ,  $\rho_b$  — насыпная плотность порошка.

статистические диаметры порошков. Установлено, что среднемассовый диаметр частиц УДП алюминия Alex в 12 ÷ 40 раз меньше, чем у микронных порошков марок АСД. В процессе хранения порошка Alex частицы агрегируют и образуют «виноградные грозди» (рис. 1, б) за счет накапливаемого на поверхности частиц электрического заряда и большей поверхностной энергии. Источником агрегации мелких частиц являются крупные частицы УДП алюминия диаметром 0.3 ÷ 0.6 мкм.

При переходе от компактного к ультрадисперсному состоянию меняются термодинамические свойства порошков металлов, смещаются линии равновесия химических реакций и фазовых превращений. При достижении пороговых температур 200 ÷ 500 °C химическая активность возрастает многократно. Повышенная химическая активность, небольшая толщина и структура оксидной оболочки облегчают спекание наноразмерных частиц металлов. Так, УДП никеля и меди, полученные методом электрического взрыва в аргоне, спекаются при температурах ≈ 145, 100 °C, а УДП алюминия — уже при комнатной температуре [6, 17, 18].

Параметры активности порошков алюминия по данным дифференциального термического анализа [15] представлены в табл. 2. С увеличением дисперсности порошка алюминия, снижаются содержание активного металла и насыпная плотность порошка. Температура интенсивного окисления микронного порошка АСД-4 (660 °C) значительно превышает температуру плавления алюминия, для УДП Alex она еще меньше и равна 548 °C. Степень окисления микронного порошка алюминия АСД-4 не превышает 2.5 %, для УДП она составляет 39.4 % при нагреве до температуры плавления. Максимальная скорость окисления тех и других порошков алюминия одинакова, но достигается в разных диапазонах температур: 970 ÷ 980 °C для АСД-4, 541 ÷ 554 °C для Alex. Толщина оксидного слоя рассчитывалась по формуле

$$\delta = \frac{d_{43}}{2} \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{1}{z_{Al}} - 1 \right) \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Al_2O_3}} \right]^{-1/3} \right\},$$

где  $z_{Al}$ ,  $\rho_{Al}$  — массовая доля, плотность алюминия,  $\rho_{Al_2O_3}$  — плотность оксида алюминия. Определенная по этой формуле толщина оксидного слоя частиц УДП алюминия со средним

размером  $d_{32} = 0.18$  мкм в 3.5 раза меньше, чем частиц микронного порошка АСД-4. По данным электронно-микроскопических исследований [18] оксидный слой частиц УДП Alex, полученного при электрическом взрыве в среде аргона, имеет рыхлую структуру и его толщина составляет  $\approx 2.5$  нм.

УДП имеют малую насыпную плотность и плохо прессуются (так, насыпная плотность УДП алюминия Alex на порядок ниже, чем у микронного порошка АСД-4). Большая удельная площадь поверхности УДП Alex увеличивает содержание адсорбированных примесей.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Исследование зажигания ГКС

Для исследования зажигания ГКС при лучистом нагреве использовались установка «Уран-1» (рис. 2, а) и  $\text{CO}_2$ -лазер непрерывного действия (рис. 2, б) [19, 20]. Время задержки зажигания  $t_{ign}$  образцов ГКС в опытах определялось по появлению видимого пламени, регистрируемого фотодиодом или ионизационным датчиком. Образцы ГКС имели форму цилиндров диаметром 10 мм и высотой 5 мм. Исследования проводились в воздухе при нормальных условиях, т. е. в среде, содержащей окислитель — кислород. Влияние концентрации окислителя в газовой окружающей среде на характеристики зажигания ГКС рассматривалось в ряде работ. В частности, в [21, 22] показано, что при значительной интенсивности тепловых потоков (выше некоторой пороговой) происходит изменение механизма зажигания безметаллических ГКС и баллиститных порохов — переход от твердофазной модели зажигания к газофазной. Для труднолетучих ГКС показана правомерность использования тепловой твердофазной теории зажигания для описания начальной стадии процесса воспламенения [23].

Интегральный лучистый поток (в широком диапазоне длин волн) от ксеноновой лампы ДКсР-10000 «Уран-1» (рис. 2, а) фокусировался эллиптическим зеркалом в пятно диаметром 12 мм. Распределение излучения по областям спектра было следующим: 0.5 кВт (9 %) в ультрафиолетовой части спектра, 2 кВт (36 %) в видимой части и 3 кВт (55 %) — в инфракрасной. Интенсивность излучения установки «Уран-1» измерялась калориметрическим методом с относительной погрешностью 10 %. Ис-

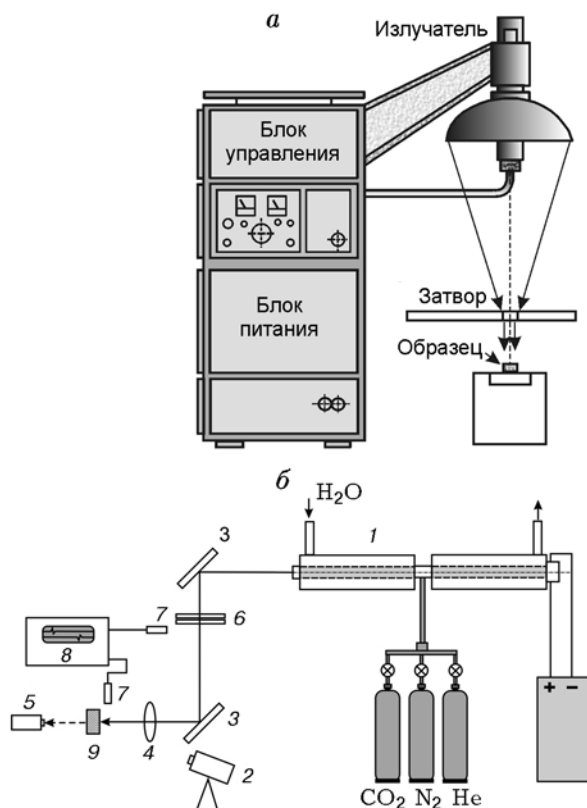


Рис. 2. Схема установки интегрального («Уран-1») (а) и монохроматического ( $\text{CO}_2$ -лазер) (б) лучистого нагрева ГКС:

1 — оптический квантовый генератор, 2 — камера тепловизора Jade J 530 SB, 3 — зеркало, напыленное золотом, 4 — хлоридонатриевая линза, 5 — приемная головка измерителя средней мощности излучения ИМО-2, 6 — электромеханический затвор, 7 — фотодиод, 8 — цифровой осциллограф OWON, 9 — исследуемый образец ГКС

пользовались медные калориметры в виде дисков диаметром 10 мм и толщиной 3 мм. Поверхность диска, поглощающая излучение, покрывалась ламповой сажей. Со стороны незачерненной поверхности диска устанавливалась термопара на глубину 1.5 мм. Измерялась скорость изменения температуры медного диска под действием излучения, поступающего к зачерненной поверхности диска, и рассчитывалась интенсивность лучистого потока теплоты по формуле

$$q = \frac{mc}{(1-R)S} \frac{\Delta T}{\Delta t},$$

где  $m$  — масса диска,  $c$  — удельная теплоемкость,  $R$  — коэффициент отражения,

$S$  — площадь зачерненной поверхности диска,  $\Delta T/\Delta t$  — скорость изменения температуры.

Электроды ионизационного датчика располагались на расстоянии  $3 \div 5$  мм от образца ГКС. При воздействии светового излучения электрический сигнал от фотодиода ФД-9К запускал электронно-счетный частотомер ЧЗ-54, а по появлению пламени срабатывал ионизационный датчик, сигнал которого также поступал на частотомер. Из показаний частотомера определялось время задержки зажигания ГКС.

Для исследования зажигания ГКС монохроматическим тепловым потоком использовалась установка на основе  $\text{CO}_2$ -лазера непрерывного действия с длиной волны излучения  $10.6$  мкм и максимальной мощностью  $100$  Вт (рис. 2, б). Время задержки зажигания ГКС определяли по сигналам двух фотодиодов, один из которых при открытии затвора включал развертку запоминающего цифрового осциллографа, второй регистрировал появление видимого пламени образца. Мощность лазерного излучения, падающего на образец ГКС, измерялась измерителем средней мощности излучения марки ИМО-2. Одновременно регистрировалось поле температур поверхности воспламенения исследуемых составов ГКС с помощью тепловизора марки Jade J 530 SB с цифровой записью на персональном компьютере в инфракрасной области спектра ( $2.5 \div 2.7$  мкм) и частотой  $100$  Гц. Относительная погрешность измерения температуры тепловизором составляла  $5\%$ .

Исследование зажигания ГКС нагретым телом проводилось в условиях кондуктивного нагрева на горячей металлической пластине (рис. 3) в диапазоне температур  $320 \div 480$  °С. Температуру поверхности пластины измеряли термопарой. Ее спай запрессовывался в канал, высверленный с тыльной стороны пластины на расстоянии  $1$  мм от внешней (рабочей) поверхности пластины, непосредственно в зоне контакта с поверхностью зажигаемого образца. ЭДС термопары измерялась микровольтметром. Термопара градуировалась по ртутному термометру в диапазоне температур  $0 \div 600$  °С с погрешностью не более  $\pm 1$  °С. Исследуемый образец ГКС крепился к штоку, который свободно перемещался в вертикальном направлении по направляющей штанге. Для исключения теплового влияния штока материал для него выбирали с теплофизическими характеристиками, близкими к соответствующим значе-

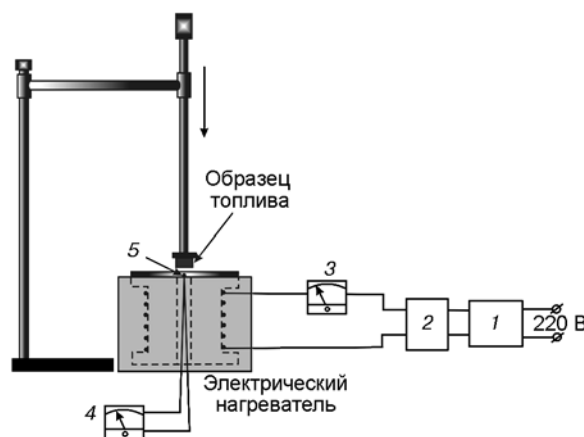


Рис. 3. Схема установки кондуктивного нагрева ГКС:

1 — стабилизатор напряжения, 2 — автотрансформатор, 3 — амперметр, 4 — микровольтметр, 5 — термопара

ниям характеристик ГКС (асбоцементная композиция). Образец ГКС прижимался к нагретой металлической пластине с силой  $\approx 3$  Н. Момент зажигания ГКС фиксировался по появлению пламени. За время задержки зажигания  $t_{ign}$  принимался промежуток времени от момента соприкосновения образца с нагретой пластиной до появления видимого пламени.

Для получения каждого значения времени задержки зажигания исследуемого состава ГКС проводилось  $3\text{--}5$  дублирующих опытов. Относительная погрешность измерения (характеризующая разброс опытных данных) при доверительной вероятности  $0.95$  составляла  $8 \div 18\%$ .

### Исследование нестационарных процессов горения ГКС

В обзорной статье [24] рассмотрены два независимых метода измерения нестационарной скорости горения, не вносящих возмущений в исследуемый процесс горения ГКС: метод скоростной киносъемки поверхности горения и метод обратных задач внутренней баллистики, основанный на регистрации зависимости давления от времени в период переходного процесса — резкого сброса давления в полузамкнутом объеме.

Процесс горения ГКС при резком сбросе давления в полузамкнутом объеме, выбранный для анализа рассмотренных методов измерения нестационарной скорости, представляет несо-

менный практический интерес (отсечка тяги двигательной установки, гашение топлива и т. д.), а также играет важную роль в тестировании физико-математических моделей нестационарного горения конденсированных систем [25, 26]. В известных вариантах этого метода используется гипотеза квазистационарности истечения при вскрытии дополнительного сопла для сброса давления и последующего гашения топлива. В работе [24] предложен метод измерения нестационарной скорости горения с учетом нестационарности истечения во время переходного процесса.

Измерения [24] проводились в модельном ракетном двигателе на твердом топливе с цилиндрической камерой сгорания диаметром 50 мм и длиной 100 мм с двумя соплами — основным и дополнительным (рис. 4). Для обеспечения адиабатичности процесса внутренние стенки камеры сгорания изолировались вкладным элементом из материала с низким коэффициентом теплопроводности (текстолитовые вкладыши). Диаметр основного сопла рассчитывался для обеспечения основного режима стационарного горения образца при давлении  $p_0 \approx 4.0$  МПа. Диаметр вспомогательного сопла варьировался с целью изменения скорости сброса давления. Вспомогательное сопло было плотно закрыто сгорающей пробкой в форме грибка из баллиститного пороха.

После воспламенения образца исследуемой ГКС в камере сгорания устанавливался стационарный режим ( $p_0 = \text{const}$ ) за счет горения образца и пороховой пробки. После сгорания и вылета пробки происходил резкий сброс давления в камере сгорания, глубина которого  $dp/dt$  определялась свободным объемом камеры и соотношением диаметров критических сечений основного и дополнительного сопел.

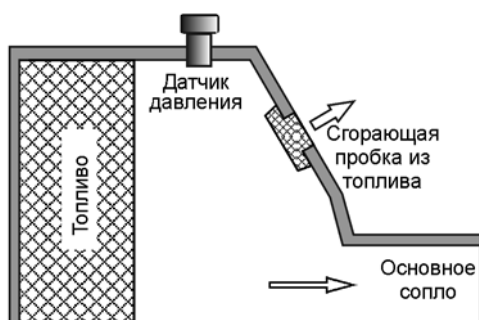


Рис. 4. Схема камеры сгорания с дополнительным соплом

По зарегистрированной кривой давления  $p(t)$  в период переходного процесса определялась нестационарная скорость горения  $u(t)$  методами решения обратной задачи внутренней баллистики [24].

### Исследование акустической проводимости поверхности горения ГКС

Стандартный способ измерения акустической проводимости поверхности горения ГКС предполагает использование Т-камеры, в которой на противоположных концах расположены одновременно воспламеняемые дискообразные образцы ГКС [27]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 5. Она включает камеру сгорания (Т-камеру) с внутренним диаметром 42 мм, исследуемые образцы ГКС, резервуар объемом 80 дм<sup>3</sup> и систему подачи сжатого воздуха. Для измерения пульсаций давления в камере установлен пьезодатчик, для измерения среднего уровня давления использовался контрольный манометр. Конструкция установки позволяет варьировать среднее давление в камере в диапазоне 1.5 ÷ 10 МПа, частоту колебаний давления в диапазоне 0.5 ÷ 4 кГц (за счет изменения длины Т-камеры), начальную температуру образцов ГКС в диапазоне –30 ÷ 50 °С, а также площадь поверхности горения образцов (за счет наличия продольных щелей на их торцевых поверхностях).

Высоту образца ГКС выбирали в интервале 10 ÷ 14 мм, чтобы подобрать такое значение параметра  $n = S_{sp}/S_{ch}$  ( $S_{sp}$  — площадь поверхности горения образца,  $S_{ch}$  — площадь поверхности торца камеры), при котором реализуется только первая гармоника продольных колебаний.



Рис. 5. Схема установки для измерения акустической проводимости ГКС (Т-камера)

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

## Время задержки зажигания ГКС

В ходе экспериментов установлено время задержки зажигания исследуемых ГКС, содержащих порошок алюминия различной дисперсности, в зависимости от интенсивности излучения и температуры нагретого блока (рис. 6, 7).

Влияние дисперсности порошка алюминия на характеристики зажигания при воздействии  $\text{CO}_2$ -лазера изучалось для двух базовых ГКС (табл. 3). Коэффициент избытка

окислителя обоих составов 0.55. В качестве металлического горючего использовались порошки алюминия АСД-4 и Alex. Размеры частиц порошков нитрата аммония, октогена (НМХ) и перхлората аммония находились в диапазоне  $160 \div 315$  мкм. Образцы ГКС цилиндрической формы диаметром 10 мм и высотой 30 мм изготавливались методом механического перемешивания исходных компонентов с последующим проходным или глухим прессованием под давлением  $\approx 215$  МПа и вулканизацией. Плотность отвержденных образцов составляла  $\rho_{sp} = 1.4 \div 1.65$  г/см<sup>3</sup> в зависимости от их компонентного состава. При проведении дублирующих опытов для одинаковых составов разброс

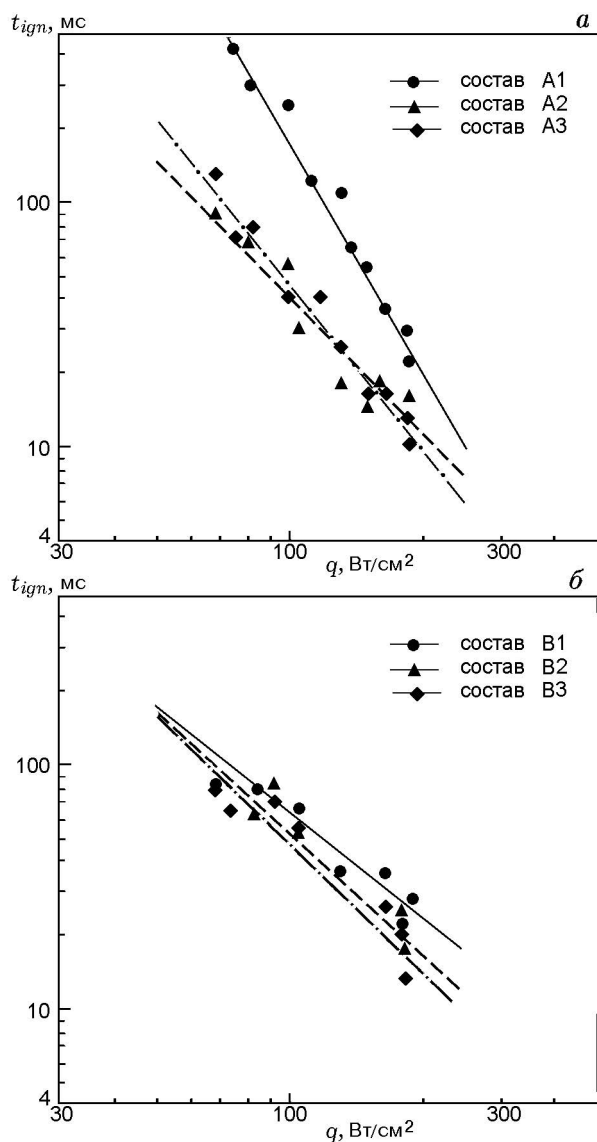


Рис. 6. Время задержки зажигания различных составов ГКС (см. табл. 3) в зависимости от интенсивности потока излучения ( $\text{CO}_2$ -лазер)

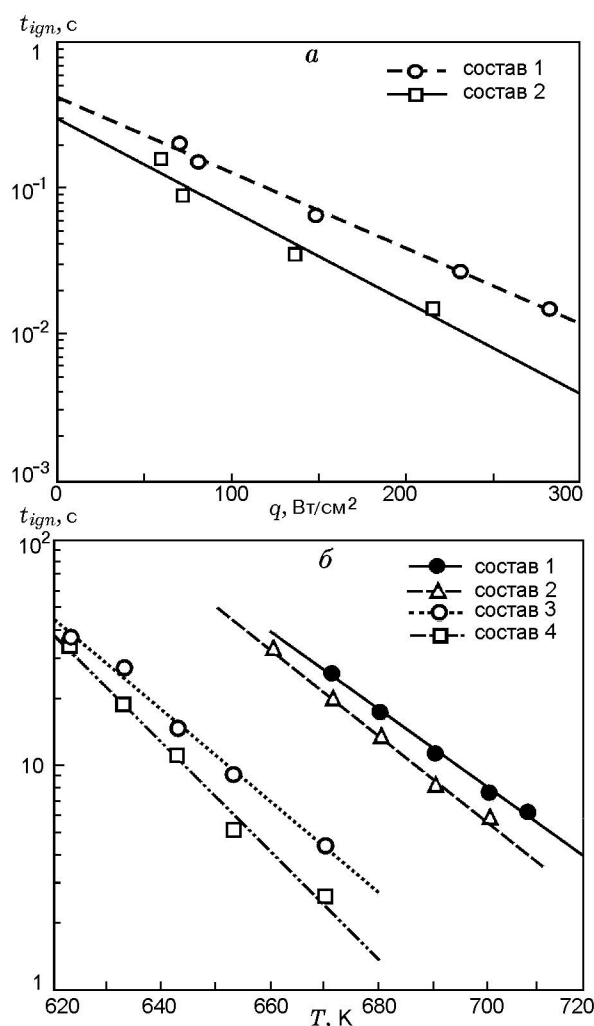


Рис. 7. Время задержки зажигания различных составов ГКС (см. табл. 4) в зависимости от интенсивности потока излучения («Уран-1») (а) и от температуры нагретого блока (кондуктивный нагрев) (б)

Таблица 3

Составы исследуемых ГКС (CO<sub>2</sub>-лазер)

Состав	Массовое содержание компонентов, %						
	НА	НМХ	ПХА	МПВТ-ЛД	СКДМ-80	Alex	АСД-4
A1	28	28	—	24	—	—	20
A2	28	28	—	24	—	10	10
A3	28	28	—	24	—	20	—
B1	29	29	15	—	12	—	15
B2	29	29	15	—	12	5	10
B3	29	29	15	—	12	15	—

Примечание. НА — нитрат аммония, ПХА — перхлорат аммония, МПВТ-ЛД — тетраэольный сополимер, пластифицированный смесевым нитроэфирным пластификатором, СКДМ-80 — бутадиеновый каучук, пластифицированный трансформаторным маслом.

плотности образцов не превышал 0.02 г/см<sup>3</sup>. Пористость образцов считалась незначительной и не контролировалась. Непосредственно перед опытом получали облучаемую поверхность образца путем среза ножом микротом. Высота образца 5 мм. При этом его торцевая поверхность была ровной, без углублений и выступов. Для снижения оптической неоднородности торцевую поверхность составов ГКС покрывали ламповой сажей.

Установлено, что ламповая сажа на поверхности горения образцов не влияет на химическое разложение компонентов в процессе лазерного зажигания ГКС. Анализ результатов исследования (см. рис. 6) показал, что с увеличением интенсивности лучистого теплового потока влияние добавки УДП алюминия Alex снижается для исследуемого состава А на основе нитрата аммония, НМХ и активного горючего-связующего. В диапазоне интенсивности теплового излучения 70 ÷ 130 Вт/см<sup>2</sup> время задержки зажигания состава А3, содержащего УДП Alex, в 4.5 ÷ 6.0 раз меньше, чем у состава А1, включающего в себя микронный порошок АСД-4. При более высокой интенсивности теплового излучения эффективность влияния дисперсности порошка алюминия уменьшается. Коэффициент эффективности равен отношению времени задержки зажигания ГКС, содержащего микронный порошок алюминия, к времени задержки зажигания ГКС, содержащего УДП. Для базового состава В он несуществен ( $K = 1.0 \div 2.1$ ) по сравнению с базовым составом А. По-видимому, это связано с термостойкостью используемого

горючего-связующего, с увеличением температуры в реакционном слое конденсированной фазы и повышением роли гетерогенных реакций в процессе зажигания ГКС. Увеличение дисперсности порошка алюминия в ГКС приводит к уменьшению времени задержки зажигания, количества подводимой теплоты и толщины реакционного слоя ГКС. За счет низкой температуры интенсивного окисления (см. табл. 2) и высокой химической активности ультрадисперсный порошок Alex увеличивает тепловой поток в к-фазу и, соответственно, повышает скорость химической реакции в конденсированном слое ГКС. Результаты термического анализа состава А2 ГКС показали, что максимальная скорость химических реакций находится в диапазоне температур 220 ÷ 230 °С, интенсивное окисление начинается при 224 °С. В диапазоне температур 550 ÷ 582 °С дополнительный вклад в процесс тепловыделения вносит добавка УДП Alex.

Тепловизионная съемка процесса зажигания [28] базового состава А ГКС при постоянной степени черноты поверхности образца  $\epsilon = 0.95$  показала, что появление видимого пламени составов А2 и А3, содержащих Alex, при интенсивности теплового излучения 60 Вт/см<sup>2</sup> происходит вблизи конденсированной фазы поверхности образца при средних температурах 660 и 545 °С. Для состава А1, содержащего АСД-4, видимое пламя появляется при средней температуре поверхности  $\approx 715$  °С, при этом наблюдаются плавление и вспенивание горючего-связующего. При дальнейшем подводе тепла отток газообразных продуктов разло-



Таблица 4  
Составы исследуемых ГКС («Уран-1»)

Состав	Массовое содержание компонентов, %				
	ПХА	БКЛ	ПБКГГ	Alex	АСД-4
1	72	18	—	—	10
2	72	18	—	10	—
3	62	—	18	—	20
4	62	—	18	20	—

Примечание. БКЛ — бутилкаучук, ПБКГГ — полибутадиеновый каучук с концевыми гидроксильными группами.

жения окислителя и горючего-связующего замедляется. Предполагается, что за счет крупных частиц алюминия толщина реакционного слоя увеличивается и тепловыделение за счет химических реакций происходит в глубинных слоях. При достижении определенной температуры начинается интенсивное выделение газообразных продуктов разложения окислителя и горючего-связующего с выбросом конденсированного слоя образца в зону пламени. Диспергированный слой сгорает с интенсивным выделением тепла. При этом средняя температура поверхности образца резко возрастает до 820 °С, порошок алюминия АСД-4 вступает в химическую реакцию, устанавливается самоподдерживающийся режим горения ГКС.

На установках интегрального лучистого нагрева «Уран-1» и кондуктивного нагрева исследовались модельные составы ГКС (табл. 4) на основе ПХА и инертного горючего-связующего (бутилкаучука, полибутадиенового каучука с концевыми гидроксильными группами) с добавлением порошка алюминия.

Анализ полученных результатов (см. рис. 7,а) показал, что время задержки воспламенения состава 1, содержащего АСД-4, уменьшается от 0.20 до 0.015 с с ростом интенсивности теплового излучения в диапазоне 70 ÷ 280 Вт/см<sup>2</sup>, а для состава 2, содержащего Alex, уменьшается от 0.16 до 0.015 с в диапазоне интенсивности излучения 58 ÷ 214 Вт/см<sup>2</sup>. При одинаковой интенсивности излучения время задержки зажигания ГКС, имеющих в составе Alex, меньше, чем у составов с АСД-4, при этом разница увеличивается с ростом интенсивности излучения.

На установке кондуктивного нагрева измерены времена задержки зажигания ГКС в зави-

симости от температуры поверхности нагретого блока (см. рис. 7,б). Из приведенных на рисунке данных видно, что с увеличением температуры поверхности блока коэффициент эффективности добавки УДП алюминия Alex возрастает.

Механизм влияния УДП алюминия на процесс зажигания ГКС определяется возможностью интенсивного окисления частиц порошка алюминия на поверхности горения или в непосредственной близости от нее. Если окисление частиц алюминия происходит в прогретом слое, возможен аномальный режим зажигания. Такой режим обнаружен при зажигании ГКС с УДП алюминия в условиях подвода тепла от нагретого блока [19, 29], когда появление пламени сопровождается резким звуковым эффектом, растрескиванием поверхностного слоя, его дроблением и выгоранием. При нагреве интегральным световым потоком тепла аномальный режим зажигания ГКС наблюдался лишь в случае, когда на поверхности образца находилась металлическая пластина.

### Нестационарная скорость горения ГКС

Влияние дисперсности порошка алюминия на нестационарную скорость горения при сбросе давления в камере сгорания исследовалось на модельном составе ГКС, содержащем 41 % ПХА, 30 % НМХ, 14 % СКДМ-80 и 15 % порошка алюминия разной дисперсности (Alex и АСД-4) [30, 31]. Использовались образцы диаметром 40 мм и высотой 30 мм, бронированные по боковой поверхности. Предварительно в бомбе постоянного объема измерялась стационарная скорость горения модельного состава ГКС в диапазоне давления окружающей среды 0.1 ÷ 6.0 МПа и определялась зависимость скорости горения от давления:  $u = 1.14p^{0.4}$  — для состава с АСД-4,  $u = 1.35p^{0.47}$  — для состава с Alex, где  $u$  — [мм/с],  $p$  — [атм].

На рис. 8 представлены результаты исследования нестационарной скорости горения модельных ГКС, содержащих АСД-4 или Alex. Рассчитанная на базе феноменологической теории Зельдовича [26] (температура поверхности  $T_s = \text{const}$ ) зависимость  $u(t)$  качественно соответствует измеренной при количественном расхождении до 32 % для состава с АСД-4.

Анализ полученных результатов по нестационарной скорости горения ГКС (см. рис. 8) показал, что во время переходного процесса горения зависимость  $u(t)$  для состава с АСД-4

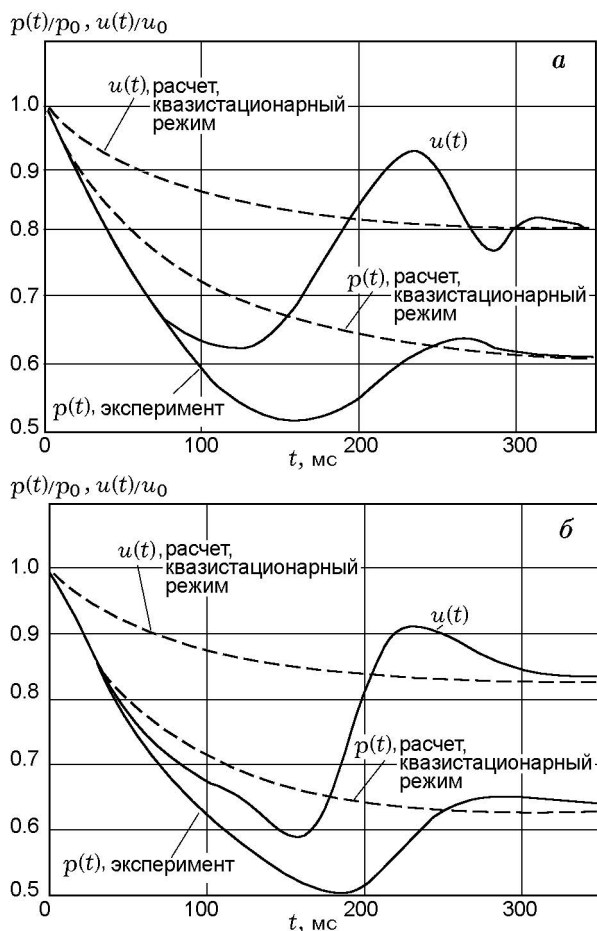


Рис. 8. Скорость горения состава ГКС на основе ПХА, НМХ, СКДМ-80, содержащего порошки Alex (а) и АСД-4 (б), в зависимости от времени вскрытия дополнительного сопла

носит колебательный характер с частотой порядка 4 Гц. При этом отклонение  $u(t)$  от квазистационарного горения может достигать 32 %. Для состава с Alex зависимость  $u(t)$  также имеет колебательный характер приблизительно с той же частотой, однако отклонение от квазистационарного значения меньше — 28 %.

#### Акустическая проводимость поверхности горения ГКС

Для исследования влияния дисперсности и содержания порошка алюминия на акустическую проводимость поверхности горения использовался модельный состав ГКС на основе ПХА и бутилкаучука СКДМ-80, содержащий по массе до 17,5 % порошка алюминия. В Т-камере проведена серия экспериментов по изучению акустической проводимости модельного

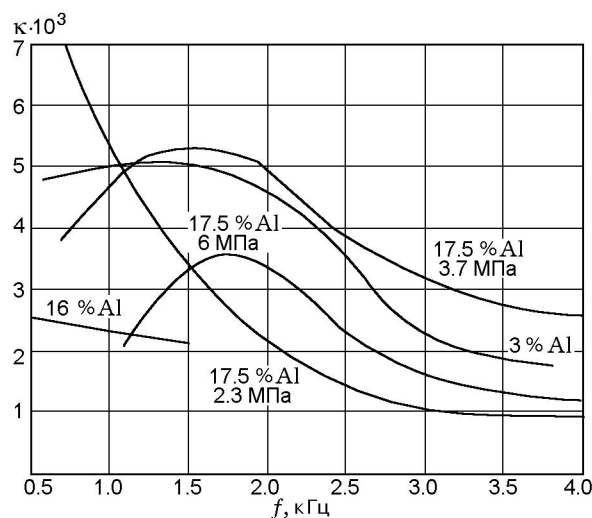


Рис. 9. Акустическая проводимость состава ГКС на основе ПХА, СКДМ-80 в зависимости от частоты при различном содержании АСД-4 и изменении давления в Т-камере

состава ГКС. Анализ результатов исследования (рис. 9) показал, что увеличение давления в камере сгорания приводит как к уменьшению максимального значения акустической проводимости, так и к смещению этого максимума в область повышенных частот. То есть повышение давления в камере сгорания ухудшает условия усиления волн на горячей поверхности ГКС. Существенное влияние на акустическую проводимость модельного состава оказывают массовое содержание и размер частиц порошка алюминия. Увеличение массового содержания порошка АСД-4 в составе ГКС от 3 до 16 % способствует стабилизации горения, что связано с демпфированием акустических колебаний конденсированными продуктами сгорания — частицами оксида алюминия. Замена микронного порошка алюминия АСД-4 на УДП Alex приводит к увеличению акустической проводимости горячей поверхности образца и снижению демпфирования колебаний в объеме Т-камеры [27].

#### ВЫВОДЫ

1. Время задержки зажигания исследуемых составов гетерогенных конденсированных систем уменьшается при увеличении дисперсности порошка алюминия из-за малого размера частиц и малой толщины оксидного слоя, более низкой температуры начала интенсивного окисления и высокой химической актив-

ности ультрадисперсного порошка алюминия Alex, что повышает интенсивность передачи тепла в конденсированный реакционный слой.

2. Появление видимого пламени исследуемого ГКС на основе нитрата аммония и энергетического горючего-связующего, содержащего ультрадисперсный порошок алюминия Alex, при интенсивности теплового излучения  $60 \text{ Вт/см}^2$  происходит вблизи конденсированной фазы поверхности образца при средней температуре  $\approx 545^\circ \text{C}$ . Уменьшение дисперсности порошка алюминия в составе ГКС приводит к увеличению средней температуры поверхности воспламенения, времени прогрева и толщины реакционного слоя, уменьшению скорости химических реакций.

3. Эксперименты по резкому сбросу давления в камере сгорания показали стабилизирующее влияние ультрадисперсного порошка алюминия (по сравнению с порошком микронных размеров) на горение гетерогенной конденсированной системы. Амплитуда колебаний скорости горения относительно квазистационарной зависимости  $u(t)$  для исследуемого состава с ультрадисперсным порошком алюминия Alex меньше, чем для состава с микронным порошком алюминия. Это свидетельствует о том, что введение ультрадисперсного порошка снижает зависимость нестационарной скорости горения ГКС от скорости изменения давления в камере сгорания.

4. Существенное влияние на акустическую проводимость состава гетерогенной конденсированной системы оказывает массовое содержание и размер частиц порошка алюминия. Увеличение содержания микронного порошка алюминия АСД-4 в составе топлива от 3 до 16 % приводит к стабилизации процесса горения, что связано с демпфированием акустических колебаний конденсированными продуктами сгорания — частицами оксида алюминия. Замена микронного порошка алюминия на ультрадисперсный приводит к увеличению акустической проводимости горячей поверхности образца, снижению демпфирования колебаний в объеме Т-камеры, что повышает склонность ГКС к возникновению вибрационного горения в камере сгорания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зенин А. А., Глазкова А. П., Лейпунский О. И., Боболев В. К. Влияние алюминия на горение перхлората аммония с полиформальдегидом // Физика горения и взрыва. — 1968. — Т. 4, № 3. — С. 299–304.
2. Ген М. Я., Фролов Ю. В., Сторожев В. Б. О горении частиц субдисперсного алюминия // Физика горения и взрыва. — 1978. — Т. 14, № 5. — С. 153–155.
3. Mench M. M., Yen C. L., Kuo K. K. Propellant burning rate enhancement and thermal behavior of ultra-fine aluminum powders (Alex) // Energetic Materials: Production, Processing and Characterization: 29th Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 1998. — P. 30-1–30-15.
4. Simonenko V. N., Zarko V. E. Comparative studying the combustion behavior of fine aluminum // Energetic Materials: Production, Processing and Characterization: 30th Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 1999. — P. 21-1–21-14.
5. DeLuca L. T., Cozzi F., Manenti S., et al. Ballistic testing of clean solid rocket propellants // Energetic Materials: Production, Processing and Characterization: 32nd Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, Germany, 2001. — P. 10-1–10-14.
6. Лернер М. И. Электровзрывные нанопорошки неорганических материалов: технология производства, характеристики, области применения: дис. ... д-ра техн. наук. — Томск, 2007.
7. Mench M. M., Kuo K. K., Yeb C. L., Lu Y. C. Comparison of thermal behavior of regular and ultra-fine aluminum powders (Alex) made from plasma explosion process // Combust. Sci. Technol. — 1998. — V. 135. — P. 269–292.
8. Price E. W. Combustion of metallized propellants // Fundamentals of Solid-Propellant Combustion / K. K. Kuo, M. Summerfield (Eds). — 1994. — P. 479–513. — (Progress in Astronaut. and Aeronaut.; V. 90).
9. Atwood A. I., Ford K. P., Bui D. T., Curran P. O., Lyle T. Radiant ignition studies of ammonium perchlorate based propellants // Progress in Propulsion Physics; V. 1 / L. DeLuca, C. Bonnal, O. Haidn, S. Frolov (Eds). — Moscow: Torus press, 2009. — P. 121–140.
10. Архипов В. А., Коротких А. Г., Кузнецов В. Т., Савельева Л. А. Влияние дисперсности добавок металлов на скорость горения смесевых композиций // Хим. физика. — 2004. — Т. 23, № 9. — С. 18–21.
11. Глотов О. Г., Ягодников Д. Н., Воробьев В. С., Зарко В. Е., Симоненко В. Н. Воспламенение, горение и агломерация капсулированных частиц алюминия в составе смесевых твердого топлива. II. Экспериментальные исследования агломерации // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 3. — С. 83–97.
12. Фролов Ю. В., Пивкин А. Н., Иванов Д. А. Структура частиц и параметры горения составов с наноалюминием // Хим. физика. — 2008. — Т. 27, № 6. — С. 54–61.
1. Зенин А. А., Глазкова А. П., Лейпунский О. И., Боболев В. К. Влияние алюминия на горение перхлората аммония с полиформальде-

13. Де Лука Л. Т., Галфетти Л., Северини Ф., Меда Л., Марра Ж., Ворожцов А. Б., Седой В. С., Бабук В. А. Горение смесевых твердых топлив с наноразмерным алюминием // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41, № 6. — С. 80–94.
14. Сакович Г. В., Архипов В. А., Ворожцов А. Б., Бондарчук С. С., Певченко Б. В. Исследование процессов горения ВЭМ с нанопорошками алюминия // Рос. нанотехнологии. — 2010. — Т. 5, № 1–2. — С. 89–101.
15. Горение нанопорошков металлов / Громов А. А., Архипов В. А., Коротких А. Г. и др. — Томск: Дельтаплан, 2008.
16. Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Г., Лернер М. И. Технология получения и дисперсные характеристики нанопорошков алюминия // Горн. журн. — 2006. — № 4. — С. 58–65.
17. Даниленко В. В. Синтез и спекание алмаза взрывом. — М.: Энергоатомиздат, 2003.
18. Ильин А. П., Громов А. А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002.
19. Архипов В. А., Коротких А. Г., Кузнецов В. Т., Синогина Е. С. Влияние дисперсности порошков металлов на характеристики кондуктивного и лучистого зажигания смесевых композиций // Хим. физика. — 2007. — Т. 26, № 6. — С. 58–67.
20. Архипов В. А., Коротких А. Г., Кузнецов В. Т., Раздобрев А. А., Евсеенко И. А. Влияние дисперсности порошка алюминия на характеристики зажигания смесевых композиций лазерным излучением // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 7. — С. 68–76.
21. Симоненко В. Н., Зарко В. Е., Кискин А. Б. Исследование нестационарных режимов горения баллистических порохов. — Новосибирск, 1980. — (Препр. / АН СССР. Сибирское отделение. ИХКиГ; № 10).
22. Кузнецов В. Т., Марусин В. П., Скорик А. И. К вопросу о механизме зажигания гетерогенных систем // Физика горения и взрыва. — 1974. — Т. 10, № 4. — С. 526–529.
23. Ассовский И. Г. Физика горения и внутренняя баллистика. — М.: Наука, 2005.
24. Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Г. Сравнительный анализ методов измерения нестационарной скорости горения. I. Методы исследования // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 5. — С. 82–87.
25. Новожилов Б. В. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. — М.: Наука, 1973.
26. Зельдович Я. Б., Лейпунский О. И., Либрович В. Б. Теория нестационарного горения пороха. — М.: Наука, 1975.
27. Архипов В. А., Волков С. А., Ревягин Л. Н. Экспериментальное исследование акустической проводимости горячей поверхности смесевых твердых топлив // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 2. — С. 74–80.
28. Arkhipov V. A., Korotkikh A. G. The influence of aluminum powder dispersity on composite solid propellants ignitability by laser radiation // Combust. Flame. — 2012. — Iss. 159. — P. 409–415.
29. Архипов В. А., Коротких А. Г., Кузнецов В. Т. Исследование процессов воспламенения и горения смесевых твердых топлив, содержащих ультрадисперсные порошки металлов // Изв. Рос. акад. ракет. и артиллер. наук. — 2005. — Вып. 1 (42). — С. 18–25.
30. Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Г. Сравнительный анализ методов измерения нестационарной скорости горения. II. Результаты исследования // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 5. — С. 88–96.
31. Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Г., Ворожцов А. Б., Бандера А., Галфетти Л., Де Лука Л., Коломбо Г. Нестационарные эффекты при горении высокоэнергетических нанокompозитов // Изв. вузов. Физика. — 2007. — Т. 50, № 9/2. — С. 3–12.

*Поступила в редакцию 2/XII 2011 г.,  
в окончательном варианте — 18/I 2012 г.*