

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ГОРЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СМЕСЕВЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

В. А. Архипов<sup>1</sup>, С. А. Волков<sup>2</sup>, Л. Н. Ревягин<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Томский государственный университет, 634050 Томск

Рассмотрен метод измерения акустической проводимости горячей поверхности твердого топлива с использованием одномерной двухконцевой камеры сгорания (Т-камеры). Представлены результаты экспериментального исследования влияния давления и частоты акустических колебаний в камере сгорания, а также компонентного состава, массового содержания и дисперсности порошка алюминия на акустическую проводимость горячей поверхности смесевых твердых топлив.

Ключевые слова: смесевое твердое топливо, порошок алюминия, поверхность горения, Т-камера, акустическая проводимость.

### ВВЕДЕНИЕ

Возникновение и развитие в объеме камеры сгорания акустических колебаний может привести к режимам высокочастотной неустойчивости ее работы — вибрационному или резонансному горению [1–3]. Возникновение акустического волнового поля связано с тем, что в камере сгорания существует источник акустической энергии, мощность которого в определенный период времени может превышать акустические потери. Главным источником усиления акустических колебаний является зона пламени или поверхность горения твердого топлива. Процесс усиления малых возмущений параметров газовой фазы, которые всегда присутствуют в виде турбулентных шумов, можно представить следующим образом. Малое изменение давления влияет на процесс горения с некоторым временем задержки, обусловленным релаксацией зон горения. Это изменение вызывает отклик горячей поверхности в виде дополнительной порции продуктов сгорания и энергии. При определенном соотношении частоты возмущений и частоты, соответствующей времени релаксации процесса горения, первоначальное малое возмущение давления усиливается.

Камера сгорания начинает работать в крайне нежелательном режиме высокочастотной неустойчивости.

Создание перспективных смесевых твердых топлив привело к появлению композиций, включающих в себя новые компоненты, относящиеся к классу взрывчатых веществ, а также ультрадисперсные порошки металлов и катализаторов, активные горючие-связующие. Скорость горения таких топлив существенно превосходит скорость горения традиционных составов. Становится реальной возможность возникновения неустойчивых режимов горения, в том числе акустической неустойчивости. При этом традиционные методы снижения высокочастотной неустойчивости могут оказаться неэффективными. В связи с этим в настоящее время повысился интерес к исследованиям высокочастотной неустойчивости камер сгорания [4, 5].

Количественной мерой оценки склонности твердых топлив к вибрационному горению является акустическая проводимость горячей поверхности топлива [1]. Акустическая проводимость горячей поверхности определяется как отношение изменения скорости оттока продуктов сгорания от поверхности топлива к давлению в звуковой волне у горячей поверхности. Величина акустической проводимости как основного источника усиления волн в продуктах сгорания позволяет судить о балансе

---

Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы при поддержке государственного контракта П474 от 04.08.2009 «Создание и переработка высокоэнергетических наполненных полимерных композиций».

акустической энергии и его изменении. Ввиду сложной природы процессов взаимодействия поверхности горения с волной давления теоретические исследования не обеспечивают получения достоверных результатов, отвечающих требованиям проектирования камер сгорания. Поэтому источником необходимой информации являются экспериментальные данные, на основе которых возможно дальнейшее развитие физической теории взаимодействия волн давления с зоной горения и в конечном счете оптимизация состава топливных композиций.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для измерения акустической проводимости горячей поверхности Хортоном была предложена одномерная двухконцевая камера сгорания [6–8], получившая название Т-камеры из-за характерной конфигурации в виде буквы «Т». Схема конструкции Т-камеры [9, 10], использованной в настоящей работе, представлена на рис. 1. Внутренний диаметр камеры сгорания 42 мм. Исследовались образцы смесевых твердых топлив (СТТ) диаметром 40 мм, толщиной  $10 \div 14$  мм, объем резервуара постоянного давления  $80 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>. Перед опытом установка заполнялась сжатым воздухом до заданного давления  $p_0$ . Пульсации давления измерялись пьезодатчиком типа ЛХ-601 и системой на базе цифрового компьютерного регистратора с относительной погрешностью 6 %. Датчик подключался к двухканальному цифровому запоминающему осциллографу PCS 500, который, в свою очередь, через порт LPT соединялся с персональным компьютером. Программа PC-Lab2000, входящая в комплект цифрового осциллографа, обеспечивает процесс измерения. Синхронизация запуска процессов в

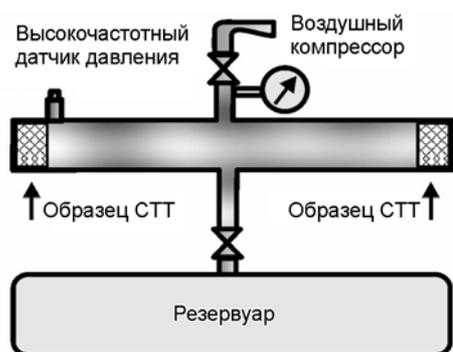


Рис. 1. Схема Т-образной камеры



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

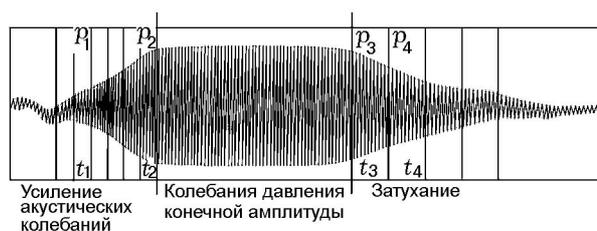


Рис. 3. Типичная осциллограмма процесса

Т-камере и начала измерения осциллографом осуществлялась двумя группами контактов на одном тумблере. Конструкция установки позволяет варьировать уровень среднего давления в камере  $p_0$  до значения 10 МПа, частоту продольных колебаний давления в диапазоне  $f = 500 \div 4000$  Гц за счет изменения длины Т-камеры  $L$ , а также площадь поверхности горения образцов СТТ за счет нанесения на их торцевые поверхности продольных щелей. Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 2, типичная осциллограмма процесса — на рис. 3.

### ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Форма исследуемых образцов представлена на рис. 4. На гладкой торцевой поверхности фрезой нарезают щели прямоугольного сечения в параллельном диаметру образца направлении. Глубину щелей  $h$  подбирали такой, чтобы получить необходимое значение площади поверхности горения  $S$ . Соотношение между шириной ребра щели и толщиной дна (во всех опытах она составляла 1 мм) образца бы-

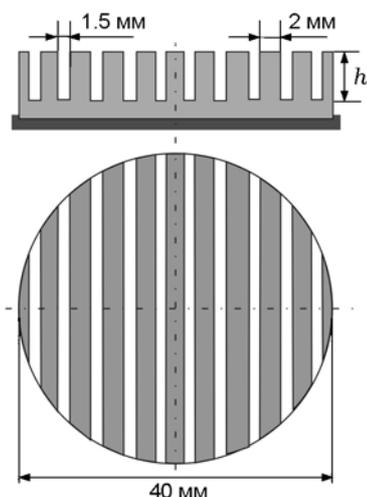


Рис. 4. Схема исследуемого образца СТТ

ло таким, чтобы обеспечивалось одновременное сгорание всего образца. На тыльную поверхность образца наносили бронировку толщиной 0.5 мм, а на ребристую поверхность насыпали навеску воспламенителя, состоящую из 0.3 г дымного ружейного пороха и 0.01 г пироксилина. Высоту образца выбирали в диапазоне  $10 \div 14$  мм для подбора такого значения параметра  $n = S/S_{ch}$  ( $S_{ch}$  — площадь поперечного сечения камеры сгорания), при котором реализовывалась бы только первая гармоника продольных колебаний. Малая поверхность горения не приводит к генерации акустических колебаний, а слишком большая способствует появлению дополнительных гармоник.

На описанной выше установке (см. рис. 1) были проведены измерения акустической проводимости горячей поверхности нескольких композиций СТТ. Составы СТТ, содержащих в качестве металлического горючего порошок алюминия марки АСД-4 ( $D_{43} = 7.34$  мкм,  $S_{уд} = 0.51$  м<sup>2</sup>/г), приведены в табл. 1. Исследованные композиции (составы 1–3) включали в качестве окислителя бидисперсный перхлорат аммония (ПХА), состоящий из механической смеси порошков ПХА дисперсностью менее 50 мкм и  $165 \div 315$  мкм в соотношении 1 : 1. В экспериментах варьировали среднее давление в камере и содержание порошка алюминия в диапазоне  $3 \div 17.5$  %, а также тип горючесвязующего — полиэтиленимин (ПЭИ) и бутилкаучук (БК) с добавлением 1 % оксида меди в качестве катализатора.

Компонентные составы СТТ, в которых в

Таблица 1  
Компонентный состав СТТ с порошком АСД-4

Номер состава	ПЭИ	БК	ПХА	АСД-4	СuO
	% (по массе)				
1	20.0	—	62.5	17.5	—
2	—	20.0	77.0	3.0	1 (сверх 100 %)
3	—	20.0	64.0	16.0	1 (сверх 100 %)

Таблица 2  
Компонентные составы СТТ с порошками АСД-4 и Alex

Номер состава	БК	СКДМ-80	ПХА	АСД-4	Alex	Хиноловый эфир
	% (по массе)					
4	18.5	—	80.0	—	—	1.5
5	18.5	—	75.0	5.0	—	1.5
6	18.5	—	75.0	—	5.0	1.5
7	—	18.6	81.4	—	—	—
8	—	17.3	75.7	—	7.0	—
9	—	15.8	69.2	—	15.0	—

качестве металлического горючего используется ультрадисперсный порошок алюминия марки Alex ( $D_{43} = 0.18$  мкм,  $S_{уд} = 13.9$  м<sup>2</sup>/г) [11], приведены в табл. 2. Данные композиции (составы 4–9) кроме бидисперсного ПХА включали в себя в качестве горючесвязующего бутилкаучук или СКДМ-80. В составах на основе БК содержалось 1.5 % технологической добавки. В экспериментах варьировали содержание порошка алюминия Alex в составе СТТ.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Конструкция Т-камеры и условия проведения экспериментов позволяют реализовать следующие допущения, лежащие в основе теоретического описания процесса акустических колебаний в продуктах сгорания этой установки [9, 10]:

- течение газа и акустические колебания одномерные, развиваются только продольные колебания;
- колебательные движения образцов топлива отсутствуют, поверхность горения абсолютно жесткая;

• влиянием осредненного поля течения продуктов сгорания можно пренебречь, а скорость диссипации (демпфирования) акустической энергии в объеме камеры сгорания одинакова в течение всего процесса.

Рассмотрим плоские акустические волны в объеме Т-камеры длиной  $L$  в системе координат, связанной с поверхностью горения образца. Ось  $Ox$  направлена в сторону горячей поверхности (в направлении падающей волны). При возникновении акустических колебаний в полости Т-камеры в режиме самовозбуждения выражения для акустического давления  $p$  в падающей и отраженной волнах могут быть представлены в виде:

$$p = p_m \exp[i(kx - \omega t)] \text{ — падающая волна,}$$

$$p = Rp_m \exp[i(-kx - \omega t)] \text{ — отраженная}$$

от поверхности горения волна,

где  $p_m$  — амплитуда колебаний акустического давления;  $x, t$  — координата и время;  $k = \omega/c$  — волновое число ( $\omega = 2\pi f$  — круговая частота,  $c$  — скорость звука в продуктах сгорания);  $R$  — комплексный коэффициент отражения волны по давлению;  $i = \sqrt{-1}$ .

Вблизи поверхности горения суммарная величина акустического давления определяется соотношением

$$p = p_m \{ \exp[i(kx - \omega t)] + R \exp[i(-kx - \omega t)] \}. \quad (1)$$

Акустическая скорость  $u$  и акустическое давление  $p$  связаны соотношением [12]

$$u = \pm p / (\rho_0 c), \quad (2)$$

где  $\rho_0$  — средняя плотность продуктов сгорания, а выбор знака  $\pm$  зависит от направления акустической волны.

С учетом (1) и (2) выражение для акустической скорости можно представить в виде

$$u = -\frac{p_m}{\rho_0 c} \{ \exp[i(kx - \omega t)] - R \exp[i(-kx - \omega t)] \}.$$

Тогда акустическая проводимость  $Y$  на поверхности горения ( $x = 0$ ) определяется формулой

$$Y = -\frac{u}{p} = \frac{1}{\rho_0 c} \frac{1 - R}{1 + R},$$

а безразмерная удельная акустическая проводимость  $\eta$  — соотношением

$$\eta = \chi + i\sigma = \rho_0 c Y = \frac{1 - R}{1 + R},$$

где  $R = (1 - \eta)/(1 + \eta) \approx 1 - 2\eta$ ,  $\text{Re}(R) = 1 - 2\chi$ .

Если действительная часть безразмерной удельной эффективной акустической проводимости горячей поверхности отрицательна ( $\chi < 0$ ), то  $\text{Re}(R) > 1$ , — волна на поверхности усиливается.

Средняя плотность энергии звукового поля  $E$  для гармонических колебаний определяется выражением [13]

$$E \sim \frac{p^2}{\rho c^2}. \quad (3)$$

При экспоненциальном увеличении амплитуды колебаний звукового давления на поверхности образца за счет горячей поверхности

$$p = p_m \exp[(\alpha + i\omega)t] \quad (4)$$

относительная скорость увеличения акустической энергии с учетом (3), (4) определяется выражением

$$\text{Re} \left( \frac{1}{E} \frac{dE}{dt} \right) = 2\alpha. \quad (5)$$

Значение  $\alpha$  может быть найдено из обработки осциллограмм процесса. Рабочий процесс в Т-камере можно разделить на три участка (см. рис. 3):

I — нарастание амплитуды колебаний  $p_m(t)$ ,

II — колебания с постоянной амплитудой  $p_m = \text{const}$ ,

III — затухание амплитуды колебаний  $p_m(t)$ .

На участке I одновременно происходят два процесса: усиление колебаний за счет воздействия поверхности горения с коэффициентом  $\alpha$ :

$$p_m(t) = p_0 \exp(\alpha t),$$

затухание (демпфирование) колебаний в объеме камеры на частицах конденсированной фазы с коэффициентом  $\alpha_d$ :

$$p_m(t) = p_0 \exp(-\alpha_d t).$$

Суммарный эффект дает усиление колебаний с коэффициентом  $\alpha_g$ :

$$p_m(t) = p_0 \exp(\alpha_g t),$$

где  $\alpha_g = \alpha - \alpha_d$ .

На участке II усиление колебаний за счет горячей поверхности компенсируется их затуханием на частицах конденсированной фазы ( $\alpha = \alpha_d$ ) и амплитуда колебаний постоянна ( $p_m = \text{const}$ ).

На участке III топливо уже не горит ( $\alpha = 0$ ) и остается только затухание колебаний в объеме камеры на частицах конденсированной фазы с коэффициентом  $\alpha_d$ .

Таким образом, измеряя по осциллограмме процесса значение  $\alpha_g$  на участке I и  $\alpha_d$  на участке III, можно определить  $\alpha = \alpha_g + \alpha_d$ .

Отметим, что эти выводы справедливы в рамках принятого и экспериментально подтвержденного допущения об экспоненциальной зависимости  $p(t)$  на участках нарастания и затухания амплитуды колебаний.

Значения  $\alpha_g$  и  $\alpha_d$  определяются по характерным точкам на осциллограмме процесса (см. рис. 3):

$$\alpha_g = \frac{\ln(p_2/p_1)}{t_2 - t_1},$$

$$\alpha_d = \frac{\ln(p_3/p_4)}{t_4 - t_3}.$$

Относительную скорость увеличения акустической энергии за период одного колебания  $T$  с учетом (5) можно представить в виде

$$\frac{T}{E} \frac{dE}{dt} = \frac{2(\alpha_g + \alpha_d)}{f}, \quad (6)$$

где  $f = T^{-1}$  — частота колебаний, а скорость изменения акустической энергии в звуковой волне на единицу площади поперечного сечения Т-камеры  $S_{ch}$  — в виде [14, 15]

$$\frac{dE}{dt} = pu. \quad (7)$$

Среднюю скорость подвода акустической энергии к газовой фазе за период одного колебания  $T$  можно получить интегрированием произведения  $\text{Re}(p)\text{Re}(u)$ , где

$$\text{Re}(p) = p_m \cos(\omega t) \exp(\alpha t),$$

$$\text{Re}(u) = -\frac{\chi p_m}{\rho_0 c} \cos(\omega t) \exp(\alpha t).$$

Из (7) следует

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= -\frac{1}{T} \int_0^T \text{Re}(p)\text{Re}(u) dt = \\ &= -\frac{1}{2} \frac{\chi}{\rho_0 c} \frac{p_m^2}{T} \frac{1}{2\alpha} \times \\ &\times [\exp(2\alpha T) - 1] \left[ 1 + \left( 1 + \frac{\omega^2}{\alpha^2} \right)^{-1} \right]. \end{aligned}$$

Разлагая экспоненту в ряд  $\exp(2\alpha T) \approx 1 + 2\alpha T$ , с учетом  $c = 2Lf$  и  $\omega \gg \alpha$ , получаем

$$\frac{T}{E} \frac{dE}{dt} = -4\chi. \quad (8)$$

Из уравнений (6) и (8) вытекает, что

$$\frac{2(\alpha_g + \alpha_d)}{f} = -4\chi.$$

Таким образом, действительная часть удельной безразмерной эффективной акустической проводимости горячей поверхности топлива равна

$$\chi = -\frac{\alpha_g + \alpha_d}{2f}.$$

Учитывая, что в двухконцевой Т-камере находятся два горящих образца, площадь  $S$  каждого из которых может быть увеличена по сравнению с площадью поперечного сечения камеры  $S_{ch}$  в  $n = S/S_{ch}$  раз, окончательно запишем

$$\chi = -\frac{\alpha_g + \alpha_d}{4nf}, \quad (9)$$

где все величины определяются из обработки данных эксперимента.

Отметим, что формула, аналогичная (9), получена в работе [8] другим методом (методом линеаризации уравнений колебательного затухающего движения элементарного объема продуктов сгорания в Т-камере).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения акустической проводимости горячей поверхности СТТ, содержащих порошок алюминия АСД-4 (составы 1–3), представлены на рис. 5. Анализ этих результатов показывает, что увеличение среднего давления в камере приводит к уменьшению максимального значения акустической проводимости и к смещению этого максимума в

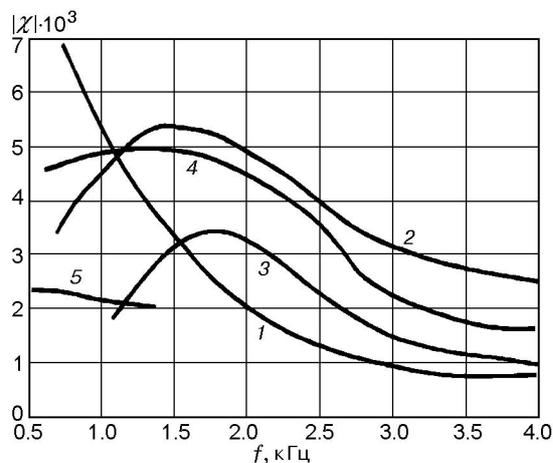


Рис. 5. Зависимость акустической проводимости от частоты для исследованных составов СТТ:

1 — состав 1,  $p_0 = 2.3$  МПа; 2 — состав 1,  $p_0 = 3.7$  МПа; 3 — состав 1,  $p_0 = 6.0$  МПа; 4 — состав 2,  $p_0 = 2.3$  МПа; 5 — состав 3,  $p_0 = 2.3$  МПа

область повышенных частот. Таким образом, увеличение  $p_0$  ухудшает условия усиления акустических волн на горячей поверхности СТТ и стабилизирует процесс горения. Увеличение содержания порошка алюминия АСД-4 в составе СТТ также приводит к стабилизации процесса горения, что связано с демпфированием акустических колебаний конденсированными продуктами сгорания — частицами оксида алюминия.

Для композиций СТТ с горючим-связующим на основе БК акустическая проводимость ниже, чем для составов на основе ПЭИ. Экспериментально установлено, что при субатмосферном давлении ( $p = 400$  Торр) скорость горения топлив на основе БК и ПЭИ составляет 0.56 и 0.72 мм/с соответственно. При начальной температуре  $T_0 = 18$  °С и давлении ниже 400 Торр топливо на основе БК не горит, а на основе ПЭИ горит вплоть до давления 50 Торр. При медленном нагревании на воздухе со скоростью 20 °С/мин навеска топлива на основе БК воспламеняется при температуре 350 °С, а топлива на основе ПЭИ — при 260 °С. Измерения температуры и визуальные наблюдения под микроскопом за поведением нагреваемых образцов топлив показали, что интенсивные превращения топлива на основе ПЭИ, сопровождающиеся разогревом и плавлением горючего-связующего, начинаются при температуре 120 °С, в то время как топли-

во на основе БК не претерпевает заметных изменений вплоть до температур, близких к температуре вспышки.

Различие акустических проводимостей топлив на основе БК и на основе ПЭИ можно объяснить различной термостойкостью горючих-связующих, что существенно на низкотемпературных стадиях горения, где время релаксации порядка  $10^{-3}$  с. Отметим, что введение катализатора (1 % оксида меди [11]) в топливо на основе БК значительно увеличивает акустическую проводимость горячей поверхности (см. рис. 5). Повышение содержания порошка алюминия АСД-4 от 3 до 16 % стабилизирует процесс горения. В частности, топливо на основе БК с 16 % алюминия АСД-4 не удается без катализатора ввести в режим самогенерации в Т-камере.

Результаты измерения акустической проводимости горячей поверхности СТТ, содержащих ультрадисперсный порошок алюминия Alex (составы 4–9), представлены в табл. 3. Все эксперименты проводили при  $p_0 = 1.9$  МПа,  $f = 600$  Гц,  $T_0 = 20$  °С. Анализ результатов показывает, что введение 5 % алюминия АСД-4 в состав СТТ на основе БК снижает акустическую проводимость на  $\approx 20$  % по сравнению с безметалльным составом. При введении в состав СТТ 5 % ультрадисперсного порошка алюминия Alex акустическая проводимость снижается в меньшей степени по сравнению с добавкой АСД-4.

Представляет интерес сравнение скоростей затухания акустических колебаний после сгорания образцов разных составов. Для безметалльного состава (образец 4) затухание складывается из затухания на стенках камеры, в сопловом блоке и в газовой фазе. При введе-

Таблица 3

Акустическая проводимость горячей поверхности образцов СТТ

Номер состава	$ \chi  \cdot 10^3$	$\alpha_d, \text{с}^{-1}$
4	5.5	11.7
5	4.4	20.2
6	5.2	15.7
7	4.0	12.3
8	6.7	18.1
9	4.2	25.3

нии 5 % АСД-4 в состав СТТ (образец 5) дополнительно появляется затухание на конденсированных частицах оксида алюминия. Из табл. 3 следует, что демпфирующее влияние конденсированных продуктов сгорания в объеме Т-камеры составляет  $\Delta\alpha_d = 20.2 - 11.7 = 8.5 \text{ с}^{-1}$  для СТТ с 5 % порошка АСД-4. Для СТТ с 5 % ультрадисперсного порошка Alex  $\Delta\alpha_d = 15.7 - 11.7 = 4.0 \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, замена порошка алюминия микронных размеров на ультрадисперсный приводит к заметному повышению удельной акустической проводимости и снижению демпфирования колебаний в объеме Т-камеры.

Анализ результатов экспериментов для составов СТТ на основе горючего-связующего СКДМ-80 (образцы 7–9) показал, что горение безметалльного состава (образец 7) более устойчиво (уменьшение  $|\chi|$  на  $\approx 36\%$ ) по сравнению с составом на основе БК. Введение 7 % ультрадисперсного порошка алюминия (образец 8) привело к увеличению  $|\chi|$  до значения  $6.7 \cdot 10^{-3}$  ( $\approx 68\%$ ). Это указывает на противоположное качественное воздействие добавки ультрадисперсного порошка алюминия по сравнению с составом на основе БК. Введение 15 % ультрадисперсного порошка алюминия (образец 9) снизило величину  $|\chi|$  до уровня, близкого к безметалльному составу. Отметим, что композиции на основе СКДМ-80 более склонны к акустической неустойчивости (при указанных условиях экспериментов), чем смеси на основе БК.

Таким образом, замена порошка алюминия микронных размеров промышленной марки АСД-4 на ультрадисперсный порошок алюминия Alex дестабилизирует процесс горения. Степень дестабилизации проявляется в большей мере для составов на основе горючего-связующего СКДМ-80.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Исследование ракетных двигателей на твердом топливе** / под ред. М. Саммерфильда. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
2. **Price E. W.** Experimental observations of combustion instability // *Fundamentals of Solid-Propellant Combustion* / К. К. Kuo, М. Summerfield (Eds). — N.-Y., 1984. — P. 733–790. — (Progress in Astronaut. and Aeronaut.; V. 90).
3. **T'ien J. S.** Theoretical analysis of combustion instability // *Ibid.* — P. 791–840.
4. **Blomshield F. S.** Pressure coupled response of solid propellants // *Eights (Intern.) Symp. on Special Topics in Chemical Propulsion, 2–6 November 2009, Cape Town, South Africa.* — P. 37.
5. **Rousseau W., Knoetze H.** Improving the method for determination of an admittance function from pulsed tubular grain motor tests // *Ibid.* — P. 112.
6. **Хортон М. Д.** Одномерная камера вибрационного горения твердого топлива // *Ракетная техника и космонавтика.* — 1961. — № 11. — С. 11–16.
7. **Хортон М. Д.** Применение одномерной Т-камеры для изучения вибрационного горения // *Ракетная техника и космонавтика.* — 1964. — № 6. — С. 65–69.
8. **Коутс Р. Л., Хортон М. Д., Райэн Н. В.** Использование метода Т-камеры для определения акустической проводимости горящих топлив // *Там же.* — С. 187–191.
9. **Медведев Ю. И., Медведева Н. П., Ревягин Л. Н.** Применение Т-камеры для изучения взаимодействия акустических волн с горячей поверхностью твердого топлива. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999.
10. **Медведев Ю. И., Медведева Н. П., Ревягин Л. Н., Скорик А. И.** Исследование взаимодействия акустических волн с горячей поверхностью твердых топлив. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004.
11. **Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Г., Лернер М. И.** Технология получения и дисперсные характеристики нанопорошков алюминия // *Горн. журн.* — Цв. металлы. (Спец. вып.). — 2006. — № 4. — С. 58–64.
12. **Тюлин В.Н.** Введение в теорию излучения и рассеяния звука. — М.: Наука, 1976.
13. **Ультразвук: маленькая энциклопедия** / гл. ред. И. П. Голямина. — М.: Сов. энцикл., 1979.
14. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** *Гидродинамика.* — М.: Наука, 1988.
15. **Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П.** Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976.

Поступила в редакцию 10/II 2010 г.,  
в окончательном варианте — 30/III 2010 г.