

## **Влияние давления и начальной температуры на характеристики горения магнийсодержащих составов с добавками фторидов металлов**

© С.В. Шибанов, П.О. Королев, А.И. Шабунин,  
В.И. Сарабьев, М.В. Хрисанфов

ОАО «Федеральный научно-производственный центр «НИИ прикладной химии», г. Сергиев Посад, Московская обл., 141313, Россия

*Выполнена оценка влияния давления и начальной температуры на параметры закона горения пиротехнических составов (ПТС) на основе магния и нитрата натрия с добавками фторидов щелочных и переходных металлов. Установлены значения температурного коэффициента для ПТС с добавками различных фторидов, построены параметрические зависимости скорости горения от давления и температуры. Выполнен анализ результатов испытаний, определены границы влияния начальных параметров на характеристики горения ПТС.*

**Ключевые слова:** пиротехнический состав, фториды металлов, влияние давления и температуры, закон горения, температурный коэффициент, уравнение регрессии.

Для большой номенклатуры пиротехнических изделий практически важной является зависимость характеристик горения, и в первую очередь скорости горения, от давления и начальной температуры  $U(p, T_0)$ . По опытным данным, скорость горения пиротехнических составов (ПТС) с повышением давления и начальной температуры обычно увеличивается [1, 2]. Это обусловлено тем, что повышение давления ускоряет реакции в газовой фазе, а повышение начальной температуры системы приводит к уменьшению затрат теплоты на ее разогрев в волне горения.

Оценку влияния давления и начальной температуры на характеристики горения выполняли для ПТС на основе магния и нитрата натрия с добавками фторидов щелочных и переходных металлов в количестве 1 %. Испытания проводили с использованием цилиндрических образцов диаметром 20 мм, изготовленных методом глухого прессования (коэффициент уплотнения 0,95) и забронированных по одному торцу и боковой поверхности. Перед испытанием образцы термостатировали при начальной температуре  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Скорость горения определяли в генераторе давления ГД-2М при значениях давления 2,0...0,5 МПа и 6,0...0,5 МПа, а также при атмосферном давлении в фотокамере [2].

В результате проведения серии опытов были получены зависимости скорости горения от давления и начальной температуры в виде степенных законов (табл. 1). Значение температурного коэффициента скорости горения определяли по выражению  $\beta = \frac{\partial \ln U}{\partial T_0}$ . На основа-

нии матрицы экспериментальных данных по скорости горения в координатах давление — температура многофакторная зависимость может быть определена параметрическим уравнением регрессии в виде [3]

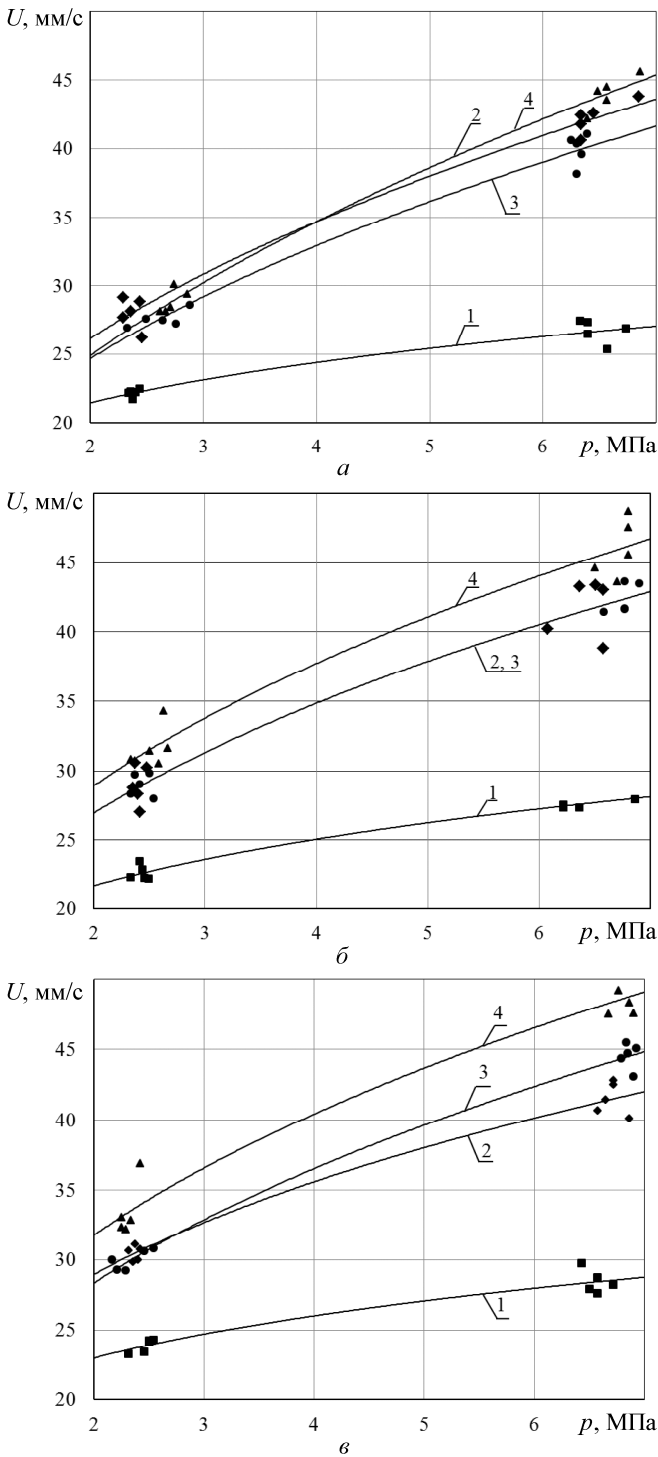
$$U(p, T_0) = a_1 p T_0 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 + a_5 T_0 + a_6 T_0^2,$$

где  $a_1$  — коэффициент зависимости величин;  $a_2, a_3$  — коэффициенты влияния давления (квадратичной и линейной составляющей соответственно);  $a_4$  — коэффициент при свободном члене;  $a_5, a_6$  — коэффициенты влияния начальной температуры (линейной и квадратичной составляющей соответственно). Значения коэффициентов  $a_1, \dots, a_6$  находили методом множественного регрессионного анализа с помощью программы Statistica [4]. Полученные результаты определения баллистических характеристик ПТС представлены в табл. 1, 2 и на рис. 1, а–в.

Таблица 1

**Зависимость скорости горения модифицированных ПТС от давления и начальной температуры**

Добавка	T, °C	Параметр закона горения		U(1), мм/с	U(20), мм/с	U(60), мм/с
		U <sub>0</sub>	v			
–	–35	12,30	0,185	11,6	21,4	26,2
	0	11,69	0,207	11,5	21,7	27,3
	35	13,44	0,179	11,8	23,0	28,0
NaF	–35	7,71	0,408	13,6	26,2	41,0
	0	8,85	0,372	14,6	27,0	40,6
	35	11,91	0,297	14,9	29,0	40,2
ZnF <sub>2</sub>	–35	7,05	0,418	13,0	24,7	39,1
	0	8,85	0,372	13,1	27,0	40,6
	35	9,47	0,366	13,6	28,4	42,4
LiF	–35	5,93	0,479	17,0	24,9	42,1
	0	9,18	0,383	17,2	28,9	44,1
	35	11,23	0,347	18,4	31,8	46,5



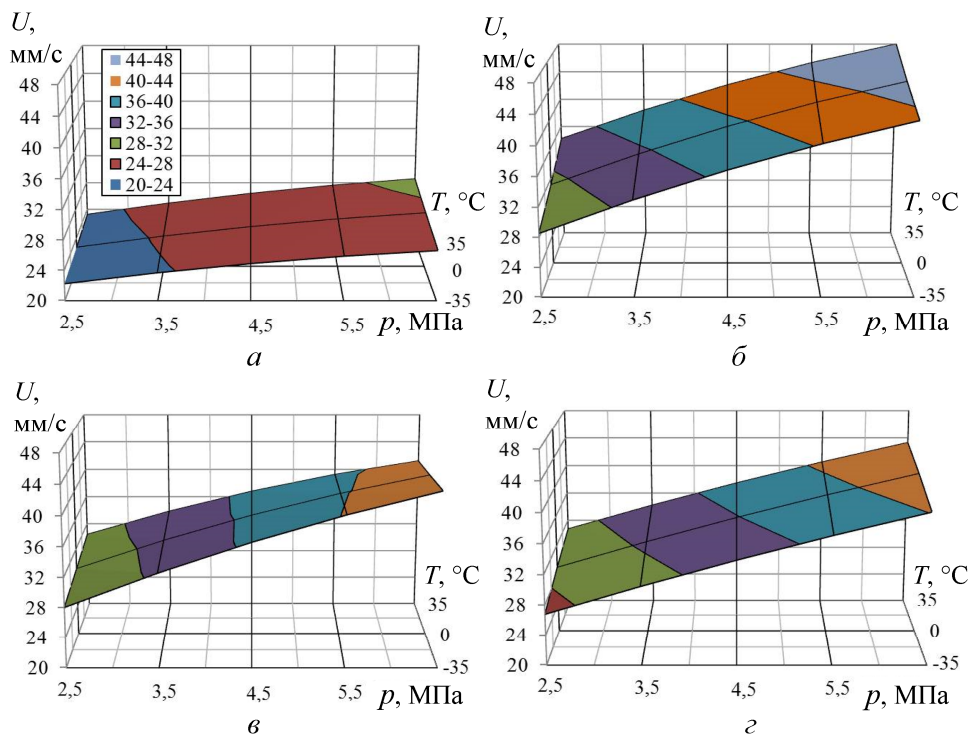
**Рис. 1.** Зависимость скорости горения ПТС от давления при различных значениях начальной температуры:  
*a* — при  $-35^\circ\text{C}$ ; *b* — при  $0^\circ\text{C}$ ; *в* — при  $+35^\circ\text{C}$  (1 — без добавки; 2 — фторид натрия; 3 — фторид цинка; 4 — фторид лития)

**Значения температурного коэффициента  $\beta$  и параметрические зависимости  $U(p, T_0)$  для модифицированных ПТС**

Добавка	$\beta \cdot 10^{-3}$ , мм/(с·К), при $p$ , МПа			$U(p, T_0)^*$	Рис. 2
	0,1	2,0	6,0		
–	0,2	1,1	0,7	$3,29 \cdot 10^{-4} PT_0 - 1,21 \cdot 10^{-3} P^2 + 0,23P + 17,67 + 5,21 \cdot 10^{-3} T_0 + 6,5 \cdot 10^{-5} T_0^2$	<i>a</i>
LiF	1,1	2,1	1,4	$-3,1 \cdot 10^{-4} PT_0 - 2,45 \cdot 10^{-3} P^2 + 0,58P + 18,25 + 8,81 \cdot 10^{-2} T_0 + 2,04 \cdot 10^{-4} T_0^2$	<i>б</i>
NaF	1,0	1,2	-0,3	$-1,54 \cdot 10^{-3} PT_0 - 2,45 \cdot 10^{-3} P^2 + 0,54P + 17,16 + 7,11 \cdot 10^{-2} T_0 - 3,27 \cdot 10^{-5} T_0^2$	<i>в</i>
ZnF <sub>2</sub>	0,6	1,2	1,6	$-2,4 \cdot 10^{-4} PT_0 - 1,14 \cdot 10^{-3} P^2 + 0,43P + 19,05 + 6,15 \cdot 10^{-2} T_0 - 1,55 \cdot 10^{-4} T_0^2$	<i>г</i>

\* Для диапазона значений  $p = 2,0 \dots 6,0$  МПа.

Полученные зависимости  $U(p, T_0)$  представлены в графическом виде на рис. 2, *a–г*.



**Рис. 2.** Зависимости  $U(p, T_0)$  для ПТС с различными добавками фторидов (*a–г*, см. табл. 2)

Из анализа результатов следует, что с увеличением скорости горения ПТС на основе магния и нитрата натрия добавки фторидов обуславливают существенное изменение температурного коэффициента. С повышением давления в диапазоне значений 0,1...6,0 МПа, при которых происходит горение ПТС, температурный коэффициент сначала увеличивается, затем уменьшается, но для ПТС с добавкой фторида цинка коэффициент  $\beta$  увеличивается во всем диапазоне. В зависимости от давления температурный коэффициент увеличивается на 10...450 %, а для ПТС с добавкой фторида натрия при давлении 6,0 МПа получено отрицательное значение  $\beta = -0,3 \cdot 10^{-3}$  мм/(с·К) (см. рис. 2, в). Как видно на рис. 2, наблюдается также увеличение зависимости скорости горения от давления для всех ПТС с добавками фторидов.

Полученные параметрические зависимости могут быть использованы для компоновки и разработки ПТС и прогнозирования их работы в составе различных изделий.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бахман Н.Н., Беляев А.Ф. *Горение гетерогенных конденсированных систем*. Москва, Наука, 1967, 266 с.
- [2] Силин Н.А., Кашпоров Л.Я., Гладун В.Д. и др. *Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем*. Москва, Машиностроение, 1982, 232 с.
- [3] Павловец Г.Я., Чучалин М.В. Методика оценки температурной зависимости скорости горения энергоемких композитов. *Химическая физика и мезоскопия*, 2011, том 13, № 2, с. 182–186.
- [4] Боровиков В.П. *Популярное введение в программу Statistica*. Москва, Компьютер-пресс, 1998, 267 с.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Шибанов С.В., Королев П.О., Шабунин А.И., Сарабьев В.И., Хрисанфов М.В. Влияние давления и начальной температуры на характеристики горения магнийсодержащих составов с добавками фторидов металлов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/712.html>

**Шибанов Сергей Владимирович** родился в 1985 г.; окончил с отличием Московский государственный индустриальный университет в 2007 г.; старший научный сотрудник Федерального научно-производственного центра «НИИ прикладной химии»; автор более 10 научных работ в области получения и применения ультра- и нанодисперсных компонентов в энергонасыщенных системах. e-mail: lab112.niiph@yandex.ru

**Королев Павел Олегович** родился в 1991 г.; окончил Московский государственный индустриальный университет в 2013 г.; инженер-конструктор Федерального научно-производственного центра «НИИ прикладной химии»; специализируется в области

исследования и разработки твердых пиротехнических топлив и зарядов для гидрореактивных и воздушно-реактивных двигателей. e-mail: lab112.niiph@yandex.ru

**Шабунин Александр Иванович** родился в 1976 г.; окончил Тульский государственный университет в 2000 г.; канд. техн. наук; начальник лаборатории Федерального научно-производственного центра «НИИ прикладной химии»; автор более 25 научных работ в области исследования и разработки твердых пиротехнических топлив и зарядов для гидро- и воздушно-реактивных двигателей и низкотемпературных газогенераторов. e-mail: lab112.niiph@yandex.ru

**Сарабьев Виктор Иванович** родился в 1947 г.; окончил Казанский химико-технологический институт им. С.М. Кирова в 1972 г.; д-р техн. наук, профессор, начальник отдела Федерального научно-производственного центра «НИИ прикладной химии» — главный конструктор по направлению; автор более 250 научных работ в области исследования и разработки пиротехнических составов и изделий на их основе. e-mail: lab112.niiph@yandex.ru

**Хрисанфов Максим Валерьевич** родился в 1990 г.; окончил Московский государственный индустриальный университет в 2012 г.; инженер-технолог Федерального научно-производственного центра «НИИ прикладной химии»; специализируется в области исследования и разработки твердых пиротехнических топлив и зарядов для воздушно-реактивных двигателей. e-mail: lab112.niiph@yandex.ru