

## О КОНВЕКТИВНОМ ГОРЕНИИ СМЕСЕЙ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ С АЛЮМИНИЕМ

В. Е. Храповский<sup>1</sup>, В. Г. Худавердиев<sup>2</sup>, А. А. Сулимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, khrapovsky@mail.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, vugarikkk@mail.ru

Экспериментально исследовано влияние формы частиц алюминия, плотности образцов, небольших добавок органического горючего (полиметилметакрилата) на возникновение и развитие конвективного горения в насыпных и подпрессованных смесях перхлората аммония с алюминием. Показано, что замена сферических частиц алюминия АСД-4 на чешуйчатые ПАП-2, увеличение плотности смеси выше определенного значения приводят к возрастанию минимальных длин образцов, при которых начинается конвективное горение и регистрируется его переход во взрывной режим. С введением небольших количеств (до 4 %) полиметилметакрилата эта длина уменьшается.

Ключевые слова: послойное горение, конвективное горение, взрывной процесс, манометрическая бомба.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1, с. 163, 176] изучалось возникновение взрыва в смесях перхлората аммония (ПХА, размер частиц 100 мкм и более) с мелкодисперсным алюминием в зарядах насыпной плотности. Содержание алюминия не превышало 27.3 %. Установлена высокая взрывоопасность таких смесей, причем наиболее опасна смесь 5 % алюминия + 95 % ПХА (размер частиц 315 ÷ 400 мкм). При использовании мелких частиц ПХА ( $\approx 14$  мкм) взрыва не наблюдалось.

В [2] проведено численное моделирование конвективного горения в прессованных системах на основе мелкодисперсного алюминия и ПХА. Представлены одномерная теоретическая модель и компьютерная программа, которые предназначены для анализа конвективного горения в двухкомпонентной смеси. Приведены варианты расчета, демонстрирующие влияние пористости образцов и размера частиц окислителя, концентрации алюминия в смеси, мощности воспламенителя, введения органического горючего.

В [3] рассмотрены результаты экспериментального исследования конвективного горения высокоплотных зарядов из смесей алюминия с ПХА пористостью 7 ÷ 18 %. Изучено влияние начальной плотности заряда, дисперсно-

сти и соотношения компонентов смеси, формы частиц алюминия, мощности воспламенителя. Определены факторы, позволяющие эффективно влиять на характеристики конвективного горения. Для анализа полученных данных использованы результаты численного моделирования. Результаты расчетов находятся в качественном согласии с экспериментальными данными.

В [4] исследовалось конвективное горение образцов насыпной плотности мелкодисперсного ПХА (20 мкм) и его смесей со сферическими частицами алюминия АСД-4 (4 мкм). Содержание алюминия варьировалось в диапазоне 0 ÷ 54 %. Показано, что в зависимости от начальной высоты образца может возникать послойное или конвективное горение, последнее при дальнейшем увеличении длины образца переходит во взрывной режим. Определены минимальные длины образца, при которых реализуется конвективное горение или взрывной процесс, выявлена их зависимость от концентрации АСД-4. Установлено, что наиболее взрывоопасна смесь 44 % АСД-4 + 56 % ПХА. Дано объяснение влияния длины образца на характер протекающих процессов. Показано, что возникновение взрывного процесса связано с воспламенением диспергированной взвеси за фронтом пламени, сопровождающимся интенсивным подъемом давления.

В настоящей работе представлены результаты, полученные в ходе продолжения исследо-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 06-03-32097, 09-03-229).

ваний [2–4] по возникновению и развитию конвективного горения в высокопористых смесях ПХА с алюминием. Изучалось влияние формы частиц алюминия, добавок органического горючего — полиметилметакрилата, плотности образцов в диапазоне изменения  $\rho = 0.6 \div 1.48 \text{ г/см}^3$  (пористость  $77 \div 33 \%$ ).

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА, ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Исследования проводили в манометрической бомбе объемом  $\approx 80 \text{ см}^3$ . Давление в ней измеряли с помощью откалиброванного пьезоэлектрического датчика Т-6000 типа «Kistler». Сигнал с датчика поступал на цифровой анализатор и выводился на компьютер. Используемая система позволяла регистрировать сигналы с разрешением до  $5 \div 10 \text{ мкс}$  между ближайшими точками и максимальным давлением до 200 МПа. Погрешность регистрации давления не превышала  $5 \div 8 \%$ .

Применялся технический перхлорат аммония со средним размером частиц  $\approx 20 \text{ мкм}$ , определенным с помощью микроскопного анализа. Использовался алюминий двух марок: АСД-4, состоящий из полидисперсных частиц сферической формы со средним диаметром  $\approx 4 \text{ мкм}$  и удельной поверхностью  $0.6 \text{ м}^2/\text{г}$ ; ПАП-2 с частицами чешуйчатой формы толщиной  $\approx 1 \text{ мкм}$  и средним линейным размером  $20 \div 30 \text{ мкм}$ .

Компоненты смеси тщательно перемешивали вручную. Микроскопный анализ смесей показал, что при использовании АСД-4 частицы алюминия и ПХА расположены отдельно, в смесях с ПАП-2 частицы ПХА обволакиваются частицами алюминия. Исследуемые смеси засыпались в плексигласовый стаканчик диаметром 10 мм, высотой  $20 \div 80 \text{ мм}$ , с толщиной стенки 3 мм. Начальная плотность смесей при этом составляла  $\approx 0.6 \text{ г/см}^3$ . Увеличение плотности достигалось либо за счет утряски, либо порционным уплотнением от руки. Смесь воспламенялась с верхнего торца с помощью навески измельченного дымного пороха массой 0.5 г, поджигаемого нихромовой спиралью. Указанная навеска создавала давление на уровне  $1.5 \div 3.0 \text{ МПа}$ .

В экспериментах с короткими образцами под действием давления, создаваемого воспламенителем, происходило уплотнение смеси и ее послойное горение. Записи  $p(t)$  в таких опытах характеризуются низкими темпа-

ми нарастания давления ( $(dp/dt)_{\max} = 0.009 \div 0.07 \text{ МПа/мс}$ ) и скоростями горения ( $W = 0.04 \div 0.09 \text{ м/с}$ ). В части опытов при сгорании образцов в таком режиме значения максимального давления не достигали уровня запуска системы регистрации ( $\approx 3 \text{ МПа}$ ) и записи давления отсутствовали.

Начиная с определенной длины  $L_{\min,c}$  (выделено курсивом в табл. 1–3) в смеси возникало и развивалось только конвективное горение, а при высоте  $L_{\min,e}$  (выделено жирным шрифтом в таблицах) и выше конвективное горение переходило во взрывной режим. Характерные записи изменения давления во времени в манометрической бомбе для первого случая представлены на рис. 1 (цифры соответствуют номеру опыта,  $L$  — длина образца,  $M$  — масса смеси). Определение основных параметров проводилось аналогично [4]. По кривой  $p(t)$  (см. рис. 1) определяли давление и время начала конвективного горения — точка  $S$  с координатами  $p_s, t_s$ , в которой начинался заметный рост давления после сгорания воспламенителя, а также давление и время окончания конвективного горения — точка  $F$  с координатами  $p_f, t_f$ , в которой достигался максимальный градиент давления  $(dp/dt)_{\max}$ . Момент достижения максимального давления — точка  $M$  с координатами  $p_m, t_m$  — соответствует окончанию догорания диспергированной взвеси. Вычислялись время распространения конвективного го-

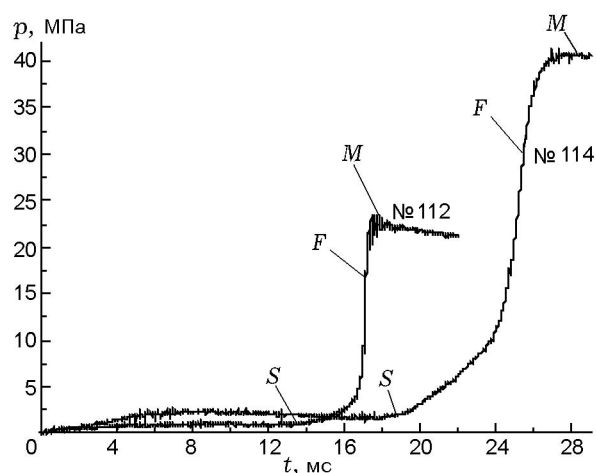


Рис. 1. Изменение давления во времени в манометрической бомбе при развитии конвективного горения в смесях:

опыт № 112 — 28% АСД-4 + 72% ПХА ( $L = 24 \text{ мм}$ ,  $M = 2.0 \text{ г}$ ), опыт № 114 28% ПАП-2 + 72% ПХА ( $L = 41 \text{ мм}$ ,  $M = 3.9 \text{ г}$ )

Таблица 1

Влияние формы и размера частиц алюминия и начальной плотности смеси на характеристики горения

Al/ПХА	Номер опыта	$M$ , г	$L$ , мм	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$m$ , %	$t_s$ , мс	$t_f (t_n)$ , мс	$t_m$ , мс	$p_s$ , МПа	$p_f (p_n)$ , МПа	$p_m$ , МПа	$(dp/dt)_{max}$ , МПа/мс	$W$ , м/с	$t_d$ , мс	Про- цесс
АСД-4/ПХА 28/72	296	0.67	8	1.03	52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ПГ
	295	1.01	13	1.00	53	10.8	15.2	105.9	1.4	4.8	12.1	2	3.0	91	КГ
	111	1.5	18	1.06	50	13.0	23.0	123	2.3	7.4	9.6	1	1.8	100	КГ
	112	2.0	24	1.06	50	14.0	17.5	18.5	1.0	17.4	22.3	160	6.9	1	КГ
	113	2.52	<b>29</b>	1.10	48	16.0	(19)	20.0	1.6	(15.6)	30.7	—	—	1	<b>Взр</b>
АСД-4/ПХА 44/56	458	0.7	15	0.60	73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ПГ
	456	1.0	20	0.64	71	18.9	31.9	55	1.9	4.7	8.4	1	1.5	23	КГ
	103	1.89	39	0.61	73	19.0	21.5	25	3.0	18	26.3	56	17	3.5	КГ
	455	2.5	49	0.65	71	2.1	5.8	8.9	1.5	20.5	31.6	58	13	3	КГ
	453	2.9	<b>58</b>	0.64	71	9.5	(11.7)	29	1.7	(5.7)	38	—	—	17	<b>Взр</b>
	104	3.88	80	0.62	72	13.0	(15.0)	22.5	2.5	(14.0)	62.5	—	—	7.5	Взр
	109	0.96	13	0.98	56	44.0	184	284	3.0	4.2	4.7	0.09	0.05	100	ПГ
	110	1.52	18	1.08	52	26.0	29.4	32.8	2.4	12.7	14.2	11	6.0	3.4	КГ
	186	1.50	<b>20</b>	0.96	57	11.6	(18.9)	20.0	0.4	(4.2)	20.0	—	—	1.1	<b>Взр</b>
	108	1.93	24	1.02	54	18.0	(22.2)	24.5	2.0	(11.2)	27.0	—	—	1.7	Взр
	105	3.19	40	1.02	54	18.5	(20.5)	22.0	3.2	(17.5)	46.0	—	—	1.5	Взр
	443	2.4	21	1.46	35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ПГ
	447	2.73	25	1.36	39	324	331	382	1.9	16	32.5	36	3.8	51	КГ
	445	4.9	<b>41</b>	1.48	33	320.4	(320.6)	328	1.5	(11)	66.0	—	—	7	<b>Взр</b>
	ПАП-2/ПХА 28/72	114	3.9	41	1.24	42	18.0	25.9	28.0	1.4	28.5	40.7	22.5	5.0	2.1
115		7.1	<b>79</b>	1.15	46	25.0	(70.0)	81	2.5	(7.5)	86.0	—	—	11	<b>Взр</b>
ПАП-2/ПХА 44/56	101	1.82	40	0.58	74	7.0	10.0	56.0	1.5	6.6	22.0	2	13.0	46	КГ
	102	3.65	80	0.58	74	4.1	6.3	33.0	2.4	19.3	45.3	9	37.0	26	КГ
	106	3.0	40	0.96	57	11.0	177	187	2.5	25.0	29.0	0.6	0.25	10	КГ
	107	7.0	80	1.10	50	35.0	279	304	3.1	42.3	76.2	0.3	0.33	25	КГ

Примечание. ПГ — послойное горение, КГ — конвективное горение, Взр — взрыв.

рения по всему образцу ( $t_f - t_s$ ) и время догорания диспергируемой взвеси ( $t_d = t_m - t_f$ ). Зная начальную длину образца и время  $t_f - t_s$ , оценивали среднюю скорость горения  $W$ .

Характерные записи  $p(t)$  при переходе конвективного горения во взрывной режим представлены на рис. 2. В этом случае дополнительно определялся момент времени  $t_n$ , когда наблюдался резкий подъем давления — точка  $N$  с координатами  $p_n$ ,  $t_n$  — с последующими, затухающими с периодом 30 ÷ 70 мкс колебаниями. Осредненное по ним давление возрастало от среднего в начале колебаний значения  $p_v$  — в точке  $V$  с координатами  $p_v$ ,  $t_v$  — до макси-

мального в точке  $M$  с координатами  $p_m$ ,  $t_m$ . Значения  $p_f$ ,  $t_f$  и скорость конвективного горения  $W$  в этом случае не вычислялись, время догорания  $t_d$  рассчитывалось как разница между  $t_v$  и  $t_m$ . Погрешность измерения вышеуказанных параметров не превышала 10 ÷ 12 %. При взрывном процессе плексигласовый стаканчик в ходе опыта полностью разрушался и сторал, а в объеме бомбы фиксировалось большое количество сажи.

О степени взрывоопасности смеси судили по минимальной длине  $L_{min,e}$ , на которой начинался взрывной процесс, а в случае его отсутствия — по максимальному градиенту дав-

Таблица 2

Влияние добавки ПММА к смеси 5% АСД-4 + 95% ПХА на характеристики горения

Номер опыта	ПММА, %	$M$ , г	$L$ , мм	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$m$ , %	$t_s$ , мс	$t_f(t_n)$ , мс	$t_m$ , мс	$p_s$ , МПа	$p_f(p_n)$ , МПа	$p_m$ , МПа	$(dp/dt)_{max}$ , МПа/мс	$W$ , м/с	$t_d$ , мс	Процесс
174	0	2.5	26	1.01	49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ПГ
172	0	3.1	40	0.99	50	31	53	122	2.1	14.8	29.3	1	1.8	69	КГ
173	0	6.7	80	1.07	46	30	54	75	1.9	28.5	97.1	58	3.3	21	КГ
281	1	2.0	26	0.98	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ПГ
305	1	2.4	32	0.96	51	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ПГ
283	1	3.2	40	0.98	50	123	186	238	2.1	25.0	41.0	2	0.7	52	КГ
280	1	5.9	80	0.94	52	18	25	35	5.1	35.7	108.6	60	10.8	10	КГ
289	2	2.0	26	0.98	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ПГ
306	2	2.3	32	0.92	53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ПГ
294	2	3.0	40	0.96	51	21	44	84	2.5	32.3	50.2	3	1.7	40	КГ
287	2	5.9	80	0.94	52	25	34	56	2.7	77.0	122.8	39	9.4	22	КГ
303	4	1.9	26	0.93	52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ПГ
304	4	2.3	32	0.92	52	26	48	62	2.7	29.3	37.7	3	1.5	14	КГ
302	4	3.1	40	0.91	53	13	(18)	26	2.6	(16.3)	50.9	—	—	8	Взр

Таблица 3

Влияние добавки ПММА к смеси 44% АСД-4 + 56% ПХА на характеристики горения

Номер опыта	ПММА, %	$M$ , г	$L$ , мм	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$m$ , %	$t_s$ , мс	$t_f(t_n)$ , мс	$t_m$ , мс	$p_s$ , МПа	$p_f(p_n)$ , МПа	$p_m$ , МПа	$(dp/dt)_{max}$ , МПа/мс	$W$ , м/с	$t_d$ , мс	Процесс
194	1	0.35	5	0.82	63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ПГ
195	1	0.74	9	0.86	61	7.6	11.2	23.0	0.9	6.0	9.6	1.9	2.6	12	КГ
187	1	0.95	13	0.88	60	14.0	19.0	27.0	0.6	7.5	10.2	2.6	2.6	8.0	КГ
189	1	1.26	17	0.88	60	5.9	(8.2)	9.0	1.1	(5.9)	16.0	—	—	0.8	Взр
185	1	1.43	20	0.89	60	4.5	(7.0)	9.5	1.0	(5.0)	17.6	—	—	3.3	Взр
197	2	0.31	4	0.83	62	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ПГ
198	2	0.77	7	1.16	47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	ПГ
188	2	1.28	13	1.18	46	7	13.7	29	1.1	7.7	12.4	1.7	2.0	15	КГ
191	2	1.41	16	1.11	49	8.9	(12.7)	15	1.1	(8.4)	18.7	—	—	2.4	Взр
184	2	1.7	20	1.08	50	6.0	(8.7)	9	1.0	(6.7)	21.0	—	—	9.0	Взр
183	4	0.32	4.5	0.85	60	12.5	17.5	25	1.9	3.0	3.8	0.3	0.9	7.5	КГ
182	4	0.67	8.0	1.0	53	8.5	13	28	0.8	2.9	6.3	0.7	1.8	15	КГ
181	4	1.02	13	0.98	54	7.6	9.9	14.6	1.3	6.3	9.7	4.6	5.7	5	КГ
192	4	1.26	16	1.01	53	5.5	(9.4)	17.0	1.4	(11.0)	16.2	—	—	7.6	Взр
180	4	1.7	21	1.06	51	8.0	(9.2)	14.0	1.5	(3.9)	19.9	—	—	4.7	Взр

ления  $(dp/dt)_{max}$  при развитии конвективного горения.

Эксперименты с оптической регистрацией [4] показали, что скорость распространения конвективного горения возрастает по длине

образца, а резкий подъем давления связан с интенсивным воспламенением диспергируемой при конвективном горении взвеси за фронтом пламени и образованием быстро расширяющейся в обе стороны вторичной волны. При до-

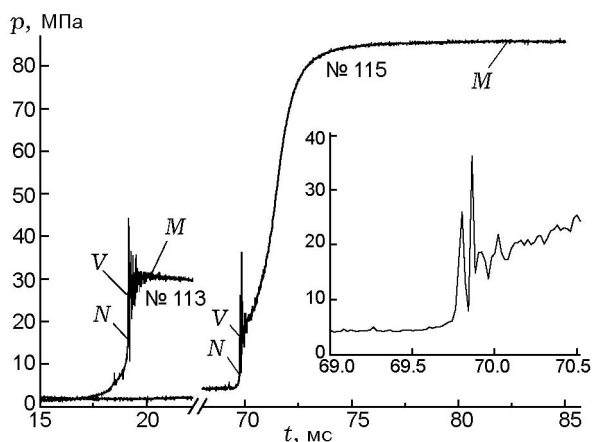


Рис. 2. Изменение давления во времени в манометрической бомбе при переходе конвективного горения во взрывной процесс:

опыт № 113 — 28% АСД-4 + 72% ПХА ( $L = 29$  мм,  $M = 2.52$  г), опыт № 115 — 28% ПАП-2 + 72% ПХА ( $L = 79$  мм,  $M = 7.1$  г)

статочной длине образца смеси взаимодействие этой волны с передним фронтом конвективного горения приводит к возникновению низкоскоростной детонации.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### Влияние формы частиц алюминия

Влияние формы частиц алюминия на возникновение и развитие конвективного горения в смеси изучалось при концентрациях металла 28 и 44 %, использовался алюминий двух марок: сферический АСД-4 и чешуйчатый ПАП-2. Установлено, что применение ПАП-2 вместо АСД-4 приводит к возрастанию задержек возникновения конвективного горения ( $t_s$ ), к уменьшению максимального значения темпа роста давления  $(dp/dt)_{\max}$  (см. рис. 1) и скорости конвективного горения при одинаковых длинах  $L$  образцов, к увеличению минимальных длин заряда  $L_{\min,e}$ , при которых реализуется взрывной процесс (табл. 1).

При содержании в смеси 44 % АСД-4 взрывной процесс начинается при высоте образца  $L = 20$  мм (№ 186, табл. 1), при использовании ПАП-2 перехода конвективного горения во взрыв не наблюдалось до максимальной высоты образца 80 мм (№ 107).

При концентрации в смеси 28 % алюминия АСД-4 взрывной процесс регистрируется начиная с высоты  $L_{\min,e} = 29$  мм (№ 113), а

при использовании ПАП-2 — с  $L_{\min,e} = 79$  мм (№ 115). При этом амплитуда подъема давления при развитии взрывного процесса (абсолютная и относительно общего подъема давления при сгорании всей смеси) для смеси с ПАП-2 заметно ниже, чем для смеси с АСД-4 (см. рис. 2). Отличается и характер подъема давления, следующего после скачка давления при взрыве. Для смеси с АСД-4 он происходит с уменьшающимся градиентом  $dp/dt$ , что указывает на воспламенение всей поверхности частиц смеси при резком подъеме давления и на последующее их догорание с сокращающейся поверхностью горения. Для смеси с ПАП-2 после интенсивного подъема давления в течение некоторого времени наблюдается его рост с увеличивающимся градиентом, что указывает на неполное воспламенение частиц при взрывном процессе и последующее их горение с возрастающей поверхностью.

В [3] показано, что при повышенной до  $\rho = 1.8$  г/см<sup>3</sup> плотности смеси использование ПАП-2 вместо АСД-4 также приводит к снижению скорости конвективного горения и темпа роста давления в манометрической бомбе.

Таким образом, в широком интервале относительной плотности (0.26 ÷ 0.84) применение алюминия марки ПАП-2 вместо АСД-4 в смеси с ПХА затрудняет развитие конвективного горения и переход его во взрыв.

В [4] показана возможность возникновения и развития конвективного горения в ПХА без добавки горючего. Изменение кривых подъема давления в манометрической бомбе при сгорании ПХА без алюминия и с добавкой к нему АСД-4 (5 %) и ПАП-2 (44 %) при одинаковых длинах образца ( $L = 80$  мм) и пористости ( $m = 50$  %) иллюстрирует рис. 3. Введение алюминия увеличивает время задержки возникновения конвективного горения ( $t_s$ ) и уменьшает скорость подъема давления на начальной стадии, что свидетельствует о затруднении возникновения конвективного горения и его развитии на этой стадии, причем при использовании ПАП-2 темп роста давления снижается сильнее. Увеличение темпа подъема давления, происходящее в дальнейшем, связано с горением алюминия в диспергированной взвеси.

Замедление скорости подъема давления на начальной стадии конвективного горения с введением алюминия можно объяснить увеличением затрат тепла на прогрев и воспламенение пор, по которым в дальнейшем распространя-

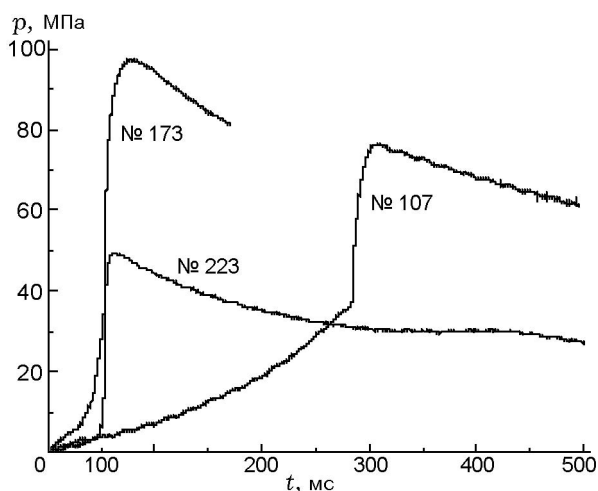


Рис. 3. Изменение давления во времени в манометрической бомбе при сгорании перхлората аммония (опыт № 223,  $M = 5.9$  г); смеси 5 % АСД-4 + 95 % ПХА (№ 173,  $M = 6.7$  г), смеси 44 % ПАП-2 + 56 % ПХА (опыт № 107,  $M = 7.0$  г)

ется конвективное горение. Более сильное влияние частиц алюминия марки ПАП-2 на развитие конвективного горения возможно связано с обволакиванием гранул ПХА частицами ПАП-2, наличием на этих частицах, помимо оксидной пленки, слоя церезина (до 3.8 %), что дополнительно затрудняет прогрев и воспламенение пор.

#### Влияние начальной плотности смеси

Влияние начальной плотности образцов изучалось на смесях с содержанием 44 % алюминия (АСД-4 и ПАП-2). Плотность варьировалась в диапазоне  $\rho = 0.58 \div 1.48$  г/см<sup>3</sup> (пористость  $m = 74 \div 33$  %).

В случае смесей с ПАП-2 увеличение плотности от 0.58 до 1.0 ÷ 1.1 г/см<sup>3</sup> затрудняет возникновение и развитие конвективного горения. Увеличиваются время задержки  $t_s$  и давление  $p_s$ , при которых начинается конвективное горение; снижаются скорости его распространения и темп нарастания давления при одинаковых длинах образцов 40 мм (№ 101, 106) и 80 мм (№ 102, 107 табл. 1, рис. 4). Изменяется характер роста давления в манометрической бомбе. Для смесей плотностью 0.58 г/см<sup>3</sup> при длинах образцов 40 и 80 мм (№ 101, 102) на начальной стадии регистрируется интенсивный подъем давления с дальнейшим замедлением темпа его роста. Увеличение начальной длины

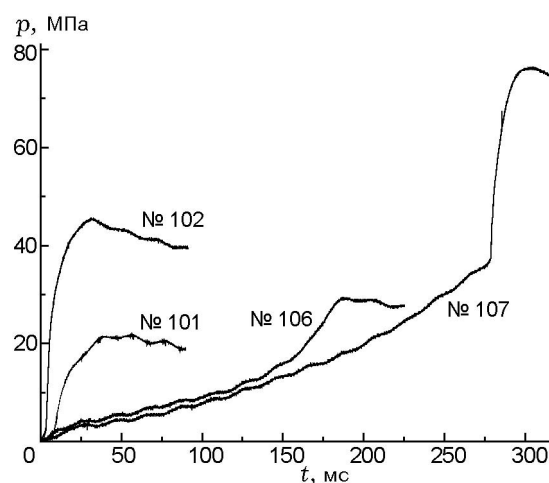


Рис. 4. Записи давления во времени при сжигании в манометрической бомбе смеси 44 % ПАП-2 + 56 % ПХА при разных начальных плотностях и длинах образцов:

опыт № 101 —  $L = 40$  мм,  $\rho = 0.58$  г/см<sup>3</sup>; № 102 —  $L = 80$  мм,  $\rho = 0.58$  г/см<sup>3</sup>; № 106 —  $L = 40$  мм,  $\rho = 0.96$  г/см<sup>3</sup>; № 107 —  $L = 80$  мм,  $\rho = 1.10$  г/см<sup>3</sup>

образца приводит к снижению времени задержки воспламенения  $t_s$ , возрастанию темпа роста давления, его максимального значения (см. рис. 4), скорости развития конвективного горения  $W$ . На уплотненных до  $\rho = 1.0 \div 1.1$  г/см<sup>3</sup> образцах (№ 106, 107) рост давления на начальной стадии происходит медленнее и практически не зависит от длины образца. Быстрый подъем давления регистрируется в дальнейшем и, вероятно, обусловлен воспламенением диспергированной взвеси. Взрывное развитие процесса не регистрировалось вплоть до максимальной длины образца, возможной в бомбе, — 80 мм.

В случае состава с АСД-4 с увеличением плотности от 0.64 до 1.08 г/см<sup>3</sup> минимальная длина заряда  $L_{\min,c}$ , при которой возникает конвективное горение, сначала практически не меняется, при дальнейшем возрастании плотности до 1.36 г/см<sup>3</sup> она увеличивается до 25 мм (см. табл. 1). Минимальная длина образца  $L_{\min,e}$ , при которой возникает взрывной процесс, при возрастании плотности от 0.64 до 0.96 г/см<sup>3</sup> уменьшается с 58 до 20 мм, при последующем повышении плотности до 1.48 г/см<sup>3</sup> длина увеличивается до 41 мм. Давление, при котором начинается конвективное горение, с ростом плотности меняется слабо и составляет  $\approx 2$  МПа. Вре-

мя задержки возникновения конвективного горения с увеличением начальной плотности от 0.64 до  $1.36 \div 1.48$  г/см<sup>3</sup> возрастает с 18.9 до  $320 \div 324$  мс. В этих смесях после сгорания воспламенителя в течение длительного времени ( $\approx 300$  мс) горение протекает первоначально в послыйном режиме. Давление  $p_n$ , при котором возникает взрывной процесс (при длинах образца  $L_{\min,e}$ ), с увеличением плотности с 0.64 до 0.96 г/см<sup>3</sup> несколько снижается (№ 453, 186), а при дальнейшем изменении плотности до 1.48 г/см<sup>3</sup> — возрастает до 11 МПа (№ 445).

В [3] показано, что при плотностях  $\rho = 1.84 \div 1.94$  г/см<sup>3</sup> образцы из смеси ПХА с 44 % АСД-4 длиной  $71 \div 74$  мм сгорали в конвективном режиме (без взрывного процесса) в интервале давлений от  $23 \div 82.5$  МПа. При  $\rho = 2.0$  г/см<sup>3</sup> конвективное горение не удалось реализовать вплоть до давления 73 МПа.

Таким образом, для смеси 44 % АСД-4 + 56 % ПХА существует определенное значение плотности (около 1 г/см<sup>3</sup>), при которой смесь наиболее взрывоопасна, имеет наименьшие значения длин  $L_{\min,c}$  и  $L_{\min,e}$ .

#### Влияние добавки частиц полиметилметакрилата

Влияние органической добавки полиметилметакрилата (ПММА) с размером частиц  $\approx 10$  мкм исследовалось на смесях ПХА с алюминием АСД-4, содержащих ПХА в избытке (95 %) или недостатке (56 %) по отношению к стехиометрии. Полимер вводился в количестве 1, 2, 4 % сверх 100 % смеси.

В случае состава 5 % АСД-4 + 95 % ПХА введение 1 и 2 % ПММА не изменяет минимальную высоту образца  $L_{\min,c} = 40$  мм, на которой возникает конвективное горение (табл. 2). При увеличении количества ПММА до 4 % значение  $L_{\min,c}$  снижается до 32 мм. При этом же количестве добавки начиная с  $L_{\min,e} = 40$  мм регистрируется взрывной процесс. Для смеси без ПММА и при его содержании до 2 % взрывной процесс не наблюдался вплоть до длины образца 80 мм, развивалось только конвективное горение. Скорости его распространения (при  $L = 80$  мм) выше для смесей с ПММА.

При высотах образца, равных минимальным длинам  $L_{\min,c} = 32 \div 40$  мм, при которых возникает конвективное горение, значения  $p_s$ ,  $(dp/dt)_{\max}$  и среднее значение  $W$  практически не меняются при введении  $1 \div 4$  % добавки, а максимальное давление в бомбе  $p_m$  увеличивается

есть.

В случае состава 44 % АСД-4 + 56 % ПХА введение ПММА сильнее влияет на возникновение и развитие конвективного горения. Минимальная высота смеси  $L_{\min,c}$ , при которой начинается конвективное горение, уменьшается с 18 мм (без ПММА, № 110, табл. 1) до 5 мм (4 % ПММА, № 183, табл. 3). Минимальная высота смеси  $L_{\min,e}$ , соответствующая возникновению взрывного процесса, изменяется слабее: при добавке 1 % ПММА она снижается с 20 до 17 мм и не меняется при последующем увеличении ПММА до 4 %. Это значение  $L_{\min,e}$  является наименьшим для исследуемых смесей АСД-4 с ПХА.

#### ВЫВОДЫ

- Установлено, что в высокопористых смесях состава перхлората аммония с алюминием замена сферических частиц алюминия АСД-4 на чешуйчатые ПАП-2 приводит к замедлению развития конвективного горения и увеличению высоты образца, при которой возникает взрывной режим.

- Обнаружено неоднозначное влияние плотности на горение смеси перхлората аммония с 44 % алюминия с частицами различной формы. При использовании чешуйчатого алюминия ПАП-2 увеличение плотности с 0.6 до  $1.0 \div 1.1$  г/см<sup>3</sup> затрудняет развитие конвективного горения и взрывного процесса. Для смесей со сферическим алюминием АСД-4 развитие конвективного горения и взрывного процесса при росте плотности в том же диапазоне ускоряется. Замедление распространения конвективного горения и увеличение минимальных длин образцов, при которых регистрируется взрывной процесс, происходит при дальнейшем повышении плотности до  $1.36 \div 1.48$  г/см<sup>3</sup>.

- Добавление органического горючего — полиметилметакрилата облегчает возникновение конвективного горения и его переход во взрывной режим при использовании смесей перхлората аммония с 5 и 44 % алюминия АСД-4 насыпной плотности. Наиболее эффективное действие добавки наблюдается при содержании 44 % алюминия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В. К., Рогожников В. М. Теория взрывчатых веществ. — М.: Высш. шк., 1967.

2. **Ермолаев Б. С., Беляев А. А., Сулимов А. А.** Численное моделирование конвективного горения пористых смесевых систем на основе мелкодисперсного алюминия и перхлората аммония // Хим. физика. — 2005. — Т. 24, № 1. — С. 84–94.
3. **Храповский В. Е., Ермолаев Б. С., Сулимов А. А. и др.** Конвективное горение прессованных зарядов из смесей алюминия и перхлората аммония // Хим. физика. — 2007. — Т. 26, № 1. — С. 35–47.
4. **Храповский В. Е., Худавердиев В. Г.** Возникновение и развитие конвективного горения в высокопористых зарядах перхлората аммония и его смесях с алюминием // Хим. физика. — 2010. — Т. 29, № 1. — С. 39–48.

*Поступила в редакцию 25/VI 2010 г.*

---