

**КОНВЕКТИВНОЕ ГОРЕНИЕ ПРЕССОВАННЫХ ЗАРЯДОВ  
ИЗ СМЕСЕЙ АЛЮМИНИЯ И ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ**© 2007 г. **В. Е. Храповский, Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов, А. А. Беляев,  
В. А. Фотеенков***Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва*

Поступила в редакцию 23.01.2006

Изучено конвективное горение смесей перхлората аммония (ПХА) с алюминием в зарядах пористостью 7–18%, изготовленных прессованием. Эксперименты проводились при давлениях до 300 МПа в манометрической бомбе с записью кривой давление–время и в установке с соплом, в которой использовались фотографическая и пьезометрическая методики регистрации. Показано, что в отличие от зарядов насыпной плотности, которые обладают повышенной взрывоопасностью, конвективное горение прессованных зарядов из смесей ПХА с алюминием распространяется без существенного ускорения, с умеренными скоростью и темпом роста давления в бомбе. Изучены основные закономерности и определены факторы, позволяющие эффективно воздействовать на характеристики конвективного горения. К ним относятся форма частиц алюминия (при замене порошка с частицами сферической формы на пудру с частицами в форме тонких чешуек с близкой удельной поверхностью скорость конвективного горения снижается более чем на порядок), соотношение компонентов смеси и пористость заряда. Среди других факторов изучено влияние размера частиц перхлората аммония, введения добавок органического горючего и мощности воспламенителя. Для анализа полученных данных использованы результаты численного моделирования. Расчеты проводились с помощью компьютерной программы, разработанной ранее на основе модели конвективного горения смесей алюминия с ПХА в манометрической бомбе. Результаты расчетов находятся в качественном согласии с экспериментальными данными и позволяют дать объяснение основным закономерностям, наблюдаемым на опыте. Исследованные составы и полученные результаты представляют интерес для разработки зарядов конвективного горения к импульсным двигателям, термо- и газогенераторам различного назначения со временами работы в диапазоне от миллисекунд до нескольких десятков миллисекунд.

**ВВЕДЕНИЕ**

Перспективы использования конвективного горения в качестве рабочего режима при разработке нового поколения импульсных генераторов послужили стимулом для более глубокого изучения свойств этого процесса. Особый интерес представляют гетерогенные высокоэнергетические смеси и, в частности, мелкодисперсные смеси на основе перхлората аммония (ПХА) и алюминия. Информация, которую можно найти в литературе по конвективному горению этих смесей, весьма ограничена. В экспериментальных работах [1, 2] приведены результаты исследования, выполненного в манометрической бомбе, которые свидетельствуют о высокой взрывоопасности смесей ПХА с мелкодисперсным алюминием в зарядах насыпной плотности. Теоретические аспекты проблемы рассмотрены в [3], где представлена модель, предназначенная для анализа конвективного горения в смесях алюминия с дисперсным окислителем, ПХА, и приведены результаты численного моделирования с варьированием входных

параметров задачи применительно к горению в манометрической бомбе.

Данная статья посвящена изучению конвективного горения смесей ПХА с алюминием в прессованных зарядах с относительной плотностью 0.82–0.93 (пористость 18–7%). Опыты проводили в манометрической бомбе с записью кривой давление–время, а также в модельной сопловой установке, позволяющей одновременно с регистрацией давления измерять скорость конвективного горения с помощью фотосъемки. Проведенные исследования показали, что в отличие от зарядов насыпной плотности, которые обладают повышенной взрывоопасностью, конвективное горение в уплотненных зарядах распространяется без существенного ускорения, с умеренными скоростью и темпом роста давления в бомбе. Изучены основные закономерности и выделена группа факторов, оказывающих эффективное воздействие на характеристики конвективного горения. Для анализа и объяснения полученных закономерностей использованы результаты численного моделирования.

## УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Опыты проводили в манометрической бомбе и модельной сопловой установке, позволяющей одновременно с измерением давления проводить фотোগрафическую регистрацию процесса горения.

Манометрическая бомба имела номинальный объем 80 см<sup>3</sup> и позволяла изучать горение зарядов общей массой (вместе с воспламенителем) до 10–12 г при давлениях до 300 МПа. Изменение давления в бомбе регистрировали с помощью пьезоэлектрического датчика Т-6000 типа Kistler, сигнал которого поступал на цифровой анализатор. Датчики давления калибровали динамико-статическим методом в режиме резкого сброса давления и сжиганием в бомбе эталонной навески пироксилинового пороха. Погрешность регистрации давления составила 5–8%.

Для приготовления исследуемых смесей использовали технический ПХА, из которого путем механического измельчения и отсева с помощью сит получали четыре фракции со средним размером частиц 6, 20, 75 и 200 мкм. Опыты проводили с алюминием трех марок: пудрой алюминиевой ПАП-2 с частицами чешуйчатой формы толщиной ~1 мкм и удельной поверхностью ~0,6 м<sup>2</sup>/г и алюминиевым порошком двух марок АСД-4 и АСД-1. Порошок АСД-4 имеет примерно ту же удельную поверхность, что и пудра ПАП-2, и состоит из полидисперсных частиц сферической формы средним диаметром ~4 мкм. Порошок АСД-1 состоит из более крупных частиц средним диаметром ~15 мкм. Компоненты смеси тщательно перемешивали вручную. Заряд состоял из одной (иногда двух) таблеток исследуемой смеси ПХА–алюминий диаметром 12 мм и высотой 17–28 мм, изготовленных двусторонним прессованием до заданной плотности, и таблетки бензотрифуроксана – быстрогорящего ВВ того же диаметра (массой 0,5 г и высотой ~2,5 мм). Горение бензотрифуроксана давало резкий всплеск давления с серией последующих колебаний и служило в качестве отметчика времени окончания стадии распространения конвективного горения. Впрочем, в некоторых опытах исследовали заряды, не содержащие бензотрифуроксана. Заряд бронировали по боковой поверхности тонким слоем эпоксидной смолы и приклеивали к дну стального стакана внутренним диаметром 16 мм, высотой 35 мм и стенками толщиной 3,5 мм. Зазор между боковой поверхностью образца и стенкой стакана заполняли глицерином.

Для инициирования горения использовали спираль накаливания и воспламеняющую смесь. Ее готовили из 1 г измельченного дымного пороха ДРП-3 и нескольких грамм смеси пироксилинового пороха “Сокол” и ДРП-3. При сгорании воспламенителя, содержащего 5 г смеси “Сокол”–ДРП-3 в пропорции 1 : 1, давление в бомбе дости-

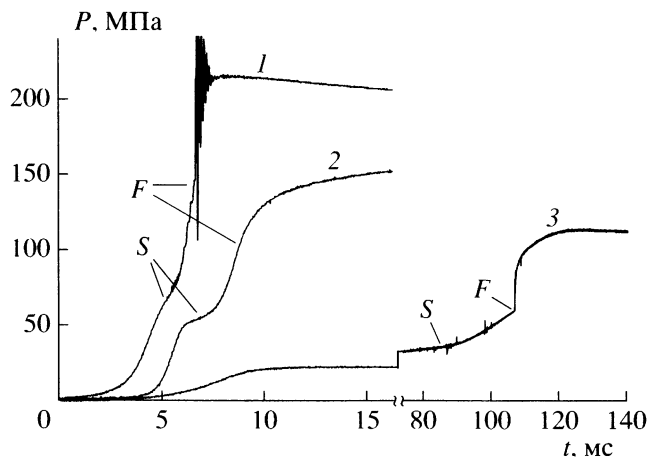
гало 50–60 МПа за время 4,5–5 мс. Если требовалось изменить давление, создаваемое воспламенителем, то, соответственно, варьировали количество смеси в интервале от 1 до 6 г, иногда меняли пропорцию “Сокол”–ДРП-3.

Модельная сопловая установка использовалась нами ранее [4] и состояла из зарядной камеры и ресивера с соплом, через который продукты сгорания вытекали из ресивера в атмосферу. Благодаря большому объему ресиверной камеры и наличию сопла давление в камере сопловой установки в процессе распространения конвективного горения нарастало существенно меньшим темпом, чем в манометрической бомбе или даже сохранялось близким к постоянному. Это позволило использовать заряды увеличенной длины до 80 мм. Исследуемый образец собирали из нескольких таблеток, изготовленных прессованием и имевших те же размеры, что и в опытах в манометрической бомбе. Образец бронировали по боковой поверхности тонким слоем эпоксидной смолы и помещали в канал прозрачной цилиндрической втулки из плексигласа внутренним диаметром 19 мм и длиной ~180 мм, которая вставлялась внутрь стальной оболочки. Зазор между боковой поверхностью заряда и стенкой прозрачной трубки заполняли глицерином. Оболочка имела продольную щель, через которую процесс распространения горения вдоль заряда фотографировали с помощью фоторегистра ФР-11. Один торец оболочки был закрыт заглушкой, а другой соединен с ресивером объемом ~750 см<sup>3</sup>, в котором размещали спираль накаливания и воспламеняющую смесь. Последняя состояла из 2–9 г ДРП-3, 0–5 г коллоксилина и 20–60 г пороха “Сокол”. Варьируя соотношение и массу компонентов этой смеси, а также диаметр сопла, можно получать диаграммы давления в ресиверной камере с желаемыми темпом нарастания давления и амплитудой. Давление в ходе опыта измеряли с помощью трех пьезоэлектрических датчиков, один из которых размещался в стенке ресивера, второй – на боковой поверхности канала втулки на расстоянии ~20 мм над открытым торцом заряда и третий – у закрытого торца заряда.

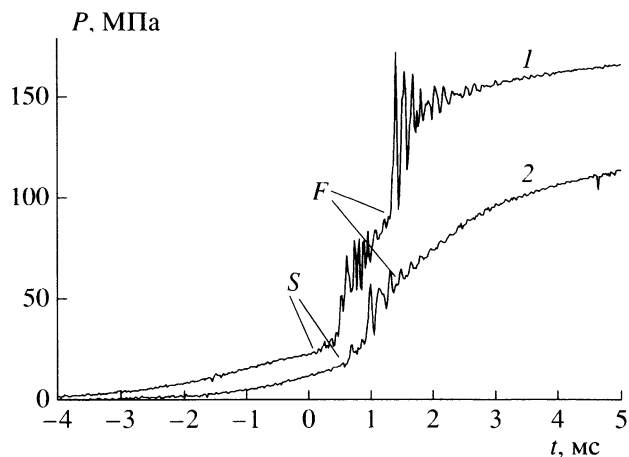
## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### *Манометрическая бомба*

На рис. 1 приведены примеры диаграмм давление–время, которые демонстрируют типичные случаи, наблюдаемые в экспериментах. Диаграммы начинаются сравнительно быстрым подъемом давления, вызванным сгоранием воспламенителя. Конвективное горение возникает в ходе горения воспламенителя (кривая 1), либо с некоторой задержкой после завершения его горения (кривая 2), или после достаточно продолжитель-



**Рис. 1.** Типичные диаграммы давление–время в опытах в манометрической бомбе: 1 – опыт 55, 44% АСД-4–56% ПХА (20 мкм); 2 – опыт 94, 44% АСД-4–56% ПХА (200 мкм), без таблетки бензотрифуроксана; 3 – опыт 62, 44% ПАП-2–56% ПХА (20 мкм).



**Рис. 2.** Диаграммы давление–время для стехиометрической смеси ПХА–алюминий АСД-1, заряды пористостью 16–17%: 1 – опыт 84; 2 – опыт 92 (без таблетки бензотрифуроксана).

ной стадии послыюного горения заряда, если давление, созданное воспламенителем, оказывается ниже критического давления срыва послыюного горения (кривая 3). Начало конвективного горения указано стрелкой с буквой *S* и определяется по ускорению роста давления. Чаще всего возникновение конвективного горения сопровождается резким изменением темпа роста давления ( $dP/dt$ ), и трудности с определением начала конвективного горения возникают лишь в случае кривой 1, когда эти изменения оказываются не слишком заметными на фоне продолжающегося горения воспламенителя. В этих ситуациях, чтобы уточнить момент начала конвективного горения, анализируемую диаграмму сравнивали с диаграммой давления, которую получали в дополнительных опытах, сжигая один воспламенитель с инертным макетом заряда.

После возникновения конвективного горения темп роста давления монотонно увеличивается, обычно достигая максимальной величины ( $dP/dt$ )<sub>м</sub> к моменту резкого взрыва давления, вызванного быстрым сгоранием таблетки бензотрифуроксана. На диаграммах этот момент, соответствующий окончанию стадии распространения конвективного горения, указан стрелкой с буквой *F*. В тех опытах, когда таблетка бензотрифуроксана отсутствовала (кривая 2), момент завершения стадии распространения определяли по началу спада  $dP/dt$  после достижения максимальной величины.

Разделив длину заряда на время между началом и завершением стадии распространения ( $t_{CB}$ ), можно оценить среднюю скорость конвективного горения ( $W_{AV}$ ). Последующий рост давления в бомбе до достижения максимума связан с догоранием взвеси горящих частиц, диспергированных

на стадии распространения. Время от завершения стадии распространения до достижения максимального давления определялось как время догорания ( $t_p$ ).

Исследовалось влияние начальной плотности (пористости) заряда, дисперсности и соотношения компонентов смеси, формы частиц алюминия, добавки органического горючего и мощности воспламенителя. Результаты типичных опытов и условия их проведения приведены в табл. 1–4. В них указаны номер опыта, сведения о массе, длине, начальной плотности и пористости заряда, массе воспламенителя и давлении, создаваемом в бомбе в результате сгорания воспламенителя. Данные, полученные обработкой диаграмм давление–время, включают давления начала ( $P_S$ ) и завершения ( $P_F$ ) конвективного горения, максимальное давление в бомбе ( $P_{max}$ ), среднюю скорость конвективного горения ( $W_{AV}$ ), максимальный темп роста давления ( $dP/dt$ )<sub>м</sub>, а также длительность стадий распространения конвективного горения ( $t_{CB}$ ) и догорания ( $t_p$ ). Примеры диаграмм давление–время даны на рис. 1–5. Номера опытов на рисунках соответствуют номерам опытов в таблицах.

Рассмотрим результаты измерений. В отличие от зарядов насыпной плотности [1, 2] опыты, проведенные с прессованными зарядами, показали, что конвективное горение в смесях алюминия с ПХА распространяется без существенного ускорения, с умеренными скоростью и темпом роста давления в бомбе. Более того, смеси с чешуйчатым алюминием ПАП-2 обнаружили неожиданно низкие скорости конвективного горения на уровне 1 м/с при максимальном темпе роста давления 1.4–4 МПа/мс (см. опыты 86 и 62 в табл. 1 и 2 и

Таблица 1. Результаты опытов в манометрической бомбе. Стехиометрическая смесь 28% алюминия–78% ПХА

Опыт №	Состав, масса/длина/плотность/пористость (г/мм/(г/см <sup>3</sup> )/%)	Воспламенитель: масса (г)** и давление (МПа)	$P_S/P_F/P_{max}$ , МПа	$W_{Al}$ , м/с	$(dP/dt)_m$ , МПа/мс	$t_{CB}$ , мс	$t_p$ , мс
64	АСД-4/ПХА (20 мкм), 5.5/27.3/1.75/17	2 + 1.5 и 32	16.5/94/140	21	130	1.3	1.2
66	АСД-4/ПХА (20 мкм), 5.9/28/1.86/12	2 + 1.5 и 32	17.5/120/155	14	100	2	1.0
83	АСД-4/ПХА (200 мкм), 4/18.5/1.86/12	3.5 + 2.5 и ~60	66/105/227	23	86	0.8	2.3
93*	АСД-4/ПХА (200 мкм), 4/18.4/1.87/12	3.5 + 2.5 и ~60	50/120/200	20	110	0.93	15.3
82	АСД-4/ПХА (75 мкм), 4/18.8/1.86/12	3.5 + 2.5 и ~60	50/127/174	24	153	0.8	1.5
81	АСД-4/ПХА (20 мкм), 4/18.8/1.9/10	3.5 + 2.5 и ~60	60/134/201	19	100	1.0	2.7
80	АСД-4/ПХА (6 мкм), 4/18.7/1.9/10	3.5 + 2.5 и ~60	50/126/176	10.2	49	1.83	4.2
86	ПАП-2/ПХА (20 мкм) 4/19.6/1.75/17	2 + 1 и ~28	52/94/156	1.4	3.9	13.7	14
84	АСД-1/ПХА (20 мкм), 4/19.9/1.78/16	2 + 1 и 25	25/95/175	16	140	1.24	8.1
92*	АСД-1/ПХА (20 мкм), 4/20.3/1.75/17	2 + 1 и 25	18/61/151	22	61	0.94	27

\* В отсутствие таблетки бензотрифуроксана.

\*\* Первая цифра обозначает массу ДРП-3, а вторая – массу пороха “Сокол” в составе воспламеняющей смеси.

кривую 3 на рис. 1). В обоих демонстрируемых опытах конвективному горению предшествовала стадия послышного горения, давление срыва составило 35–50 МПа.

При замене пудры ПАП-2 на тонкодисперсный сферический алюминий марки АСД-4 ско-

рость конвективного горения и темп роста давления увеличиваются более чем в 10 раз. (Здесь можно сопоставить опыты 64 и 86 в табл. 1, а также опыты 87 и 62 в табл. 2). Горение демонстрирует высокие и хорошо воспроизводимые от опыта к опыту характеристики, как при стехиометриче-

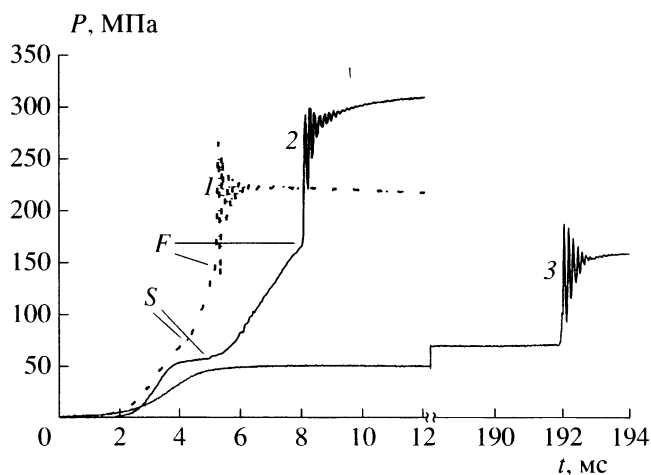


Рис. 3. Влияние пористости заряда; смесь 44% АСД-4–56% ПХА (20 мкм): 1 – опыт 54 (пористость 14%), 2 – опыт 44 (10%), 3 – опыт 52 (9%).

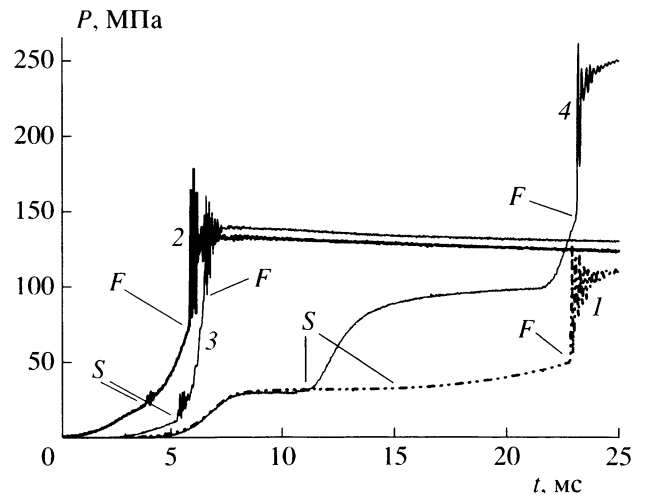


Рис. 4. Влияние содержания алюминия АСД-4 в смесях с ПХА (20 мкм): 1 – опыт 73 (0% алюминия), 2 – опыт 89 (10%), 3 – опыт 64 (28%), 4 – опыт 45 (54%).

Таблица 2. Результаты опытов в манометрической бомбе. Смесь 44% алюминия–56% ПХА

Опыт №	Состав, масса/длина/плотность/пористость (г/мм/ (г/см <sup>3</sup> )/%)	Воспламенитель: масса (г)** и давление (МПа)	$P_s/P_f/P_{max}$ , МПа	$W_{AV}$ , м/с	$(dP/dt)_m$ , МПа/мс	$t_{CB}$ , мс	$t_p$ , мс
87	АСД-4/ПХА (20 мкм), 4/18.8/1.9/14	2.25 + 1.25 и ~30	24/70/140	10.3	43	1.83	4.2
54	АСД-4/ПХА (20 мкм), 4/18.6/1.91/14	3.5 + 2.5 и ~75	73/157/225	20.7	100	0.9	1.6
55	АСД-4/ПХА (20 мкм), 4/18.3/1.94/12	3.5 + 2.5 и ~70	67/147/216	15.2	90	1.2	1.5
75	АСД-4/ПХА (20 мкм), 4/18.5/1.91/13	1 + 0.5 и ~10	18.2/40.9/108	9.7	20.3	1.9	4.6
44	АСД-4/ПХА (20 мкм), 8/35.6/2.0/10	4.3 + 2.4 и ~60	61.5/169/310	12	46	3	3.2
52	АСД-4/ПХА (20 мкм), 4/17.3/2.02/9	3 + 2 и 52	Заряд сгорел в послыном режиме со скоростью ~11 см/с, давление срыва >73 МПа				
76	АСД-4/ПХА (200 мкм), 4/17.9/1.98/10	3 + 2.5 и 60	56.4/70.5/185	13.8	18.6	1.3	4.8
94*	АСД-4/ПХА (200 мкм), 4/18/1.98/10	3.5 + 2.5 и 60	54.8/106/164	9	43	2	38
48	АСД-4/ПХА (75 мкм), 4/18.2/1.97/10	3.5 + 2.5 и 52.5	53/93.2/179	8	26	2.28	1.2
62	ПАП-2/ПХА (20 мкм), 4/18.8/1.85/16	2.5 + 1.5 и 22	35.4/59/113	0.94	1.4	20	17.6

\* В отсутствие таблетки бензотрифуроксана.

\*\* Первая цифра обозначает массу ДРП-3, а вторая – массу пороха “Сокол” в составе воспламеняющей смеси.

Таблица 3. Результаты опытов в манометрической бомбе. ПХА и его смеси

Опыт №	Состав, масса/длина/плотность/пористость (г/мм/ (г/см <sup>3</sup> )/%)	Воспламенитель: масса (г)* и давление (МПа)	$P_s/P_f/P_{max}$ , МПа	$W_{AV}$ , м/с	$(dP/dt)_m$ , МПа/мс	$t_{CB}$ , мс	$t_p$ , мс
73	ПХА (20 мкм), 3.5/19/1.62/17	2 + 1.5 и 32	34/51/124	2.5	4.1	7.5	19
70	ПХА (20 мкм), 4/20.4/1.72/12	2 + 1.5 и 32	34/72.6/119	1.0	2.8	21.2	8
89	10/90 АСД-4/ПХА (20 мкм), 4/20.9/1.69/16	2 + 1.5 и 28	20/76.2/134.5	11.3	40	1.86	0.9
67	21/79 АСД-4/ПХА (20 мкм), 5.5/26.6/1.82/12	2 + 1.5 и 28	19.2/96.3/139	12.7	59	2.1	4.6
45	54/46 АСД-4/ПХА (20 мкм), 8/37.3/1.9/17	2.5 + 1.5 и 30	31.6/150/257	3	51	12.5	5.3

\* Первая цифра обозначает массу ДРП-3, а вторая – массу пороха “Сокол” в составе воспламеняющей смеси.

ском соотношении компонентов (28% алюминия в смеси), так и при избытке алюминия в смеси до 44%. Давление срыва послыного горения для зарядов пористостью 17% снижается до 12–16 МПа.

Было проведено несколько опытов со смесями, в которых использовался сферический алю-

миний марки АСД-1, имеющий частицы более крупного размера (см. опыты 84 и 92 в табл. 1 и на рис. 2). Характеристики конвективного горения оказались близки тем, что наблюдались на смесях с АСД-4. Однако на диаграммах давления во всех опытах имелись сильные колебания давления, что

Таблица 4. Опыты в манометрической бомбе с добавкой полиметакрилата к смеси 44% АСД-4-56% ПХА (20 мкм)

Опыт №	Добавка, масса/длина/плотность/пористость (вес. %, г/мм/(г/см <sup>3</sup> )/%)	Воспламенитель: масса (г)* и давление (МПа)	$P_S/P_F/P_{max}$ , МПа	$W_{Al}$ , м/с	$(dP/dt)_m$ , МПа/мс	$t_{CB}$ , мс	$t_p$ , мс
57	2, 4/18.3/1.93/11	3.5 + 2.5 и 61.4	55.5/114.6/173	14	68	1.3	2.3
58	4, 4/18.2/1.90/11	3.5 + 2.5 и 62	40/90/130	12	48	1.61	2.4

\* Первая цифра обозначает массу ДРП-3, а вторая – массу пороха “Сокол” в составе воспламеняющей смеси.

затрудняло анализ. Для выяснения причин обнаруженного эффекта потребуются дополнительные исследования, хотя можно предположить, что после воспламенения заряда конвективное горение быстро достигало высоких скоростей, что сопровождалось появлением значительного перепада давления между зарядом и камерой бомбы и приводило к появлению волновых пульсаций давления. Затем, однако, скорость конвективного горения снижалась, и пульсации ослабевали.

Влияние пористости заряда, дисперсности ПХА, соотношения компонентов, массы воспламенителя и добавки полимерного горючего изучалось на смесях с АСД-4. Влияние плотности (пористости) заряда демонстрируется двумя сериями опытов, проведенными с 20-мкм ПХА. Опыты 64 и 66 со стехиометрической смесью приведены в табл. 1, а опыты 54, 55, 44 и 52 со смесью, содержащей 44% алюминия, – в табл. 2 и на рис. 3. В целом, при уменьшении пористости характеристики конвективного горения снижаются, конвективное горение труднее инициируется и давление срыва послыного горения повышается. Эффект, который проявляется в умеренной форме в диапазоне пористостей от 17 до 10%, становится более резким при дальнейшем снижении пористости. Так, в

опыте 52 с зарядом пористостью 9% заряд горел в послыном режиме до давления 73 МПа, и конвективное горение отсутствовало.

Влияние размера частиц ПХА изучалось на зарядах пористостью 10–12% при двух соотношениях компонентов. Серия опытов 80–83 и 93, представленная в табл. 1, выполнена на стехиометрической смеси. В этой серии заряды с 200-, 75- и 20-мкм ПХА дали близкие значения скорости конвективного горения, и лишь в случае 6-мкм ПХА скорость заметно снизилась. Наиболее высокий темп роста давления наблюдался с 75-мкм ПХА. При изменении размера частиц – укрупнении или уменьшении – рост давления замедлялся. Опыты 48, 44, 76 и 94, приведенные в табл. 2, выполнены на смесях, содержащих 44% алюминия. В этой серии опытов смесь с 75-мкм ПХА уже не имеет преимуществ по темпу роста давления, четкие тенденции относительно скорости конвективного горения и темпа роста давления не просматриваются.

Влияние содержания алюминия в смеси иллюстрируется на зарядах пористостью 14–17% (опыт 64 в табл. 1, опыт 54 в табл. 2 и опыты 73, 89 и 45 в табл. 3, а также на рис. 4) и 12% (опыт 66 в табл. 1, опыт 55 в табл. 2 и опыты 70 и 67 в табл. 3). В этих опытах использовался 20-мкм ПХА. В целом, стехиометрическая смесь и смесь, содержащая 44% алюминия, демонстрируют примерно одинаково высокие скорости конвективного горения и темпы роста давления. При уменьшении содержания алюминия до 21 и 10% характеристики горения снижаются. Опыт 45, проведенный при содержании алюминия 54%, демонстрирует необычную диаграмму давления, которая на стадии конвективного горения состоит из двух участков роста давления, разделенных платообразным участком длительностью ~7 мс. Скорее всего, имеют место две фазы конвективного горения, разделенные фазой депрессии, во время которой распространение фронта горения вдоль заряда резко затормозилось. Хотя на фазах конвективного горения давление растет темпом, которое не слишком сильно уступает темпам роста в опытах со стехиометрическим соотношением компонентов, из-за большого содержания алюминия конвективное горение не смогло в один прием охватить всю длину заряда. Это выразилось в существенном сниже-

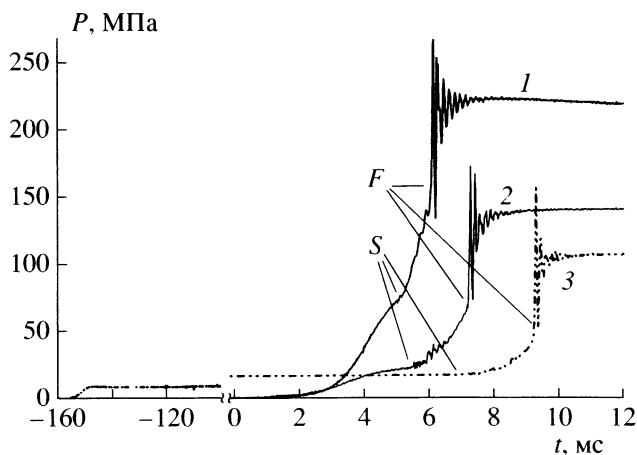


Рис. 5. Влияние массы воспламенителя; смесь 44% АСД-4-56% ПХА (20 мкм), заряды пористостью 14%: 1 – опыт 54 (6 г), 2 – опыт 87 (3.5 г), 3 – опыт 75 (1.5 г).

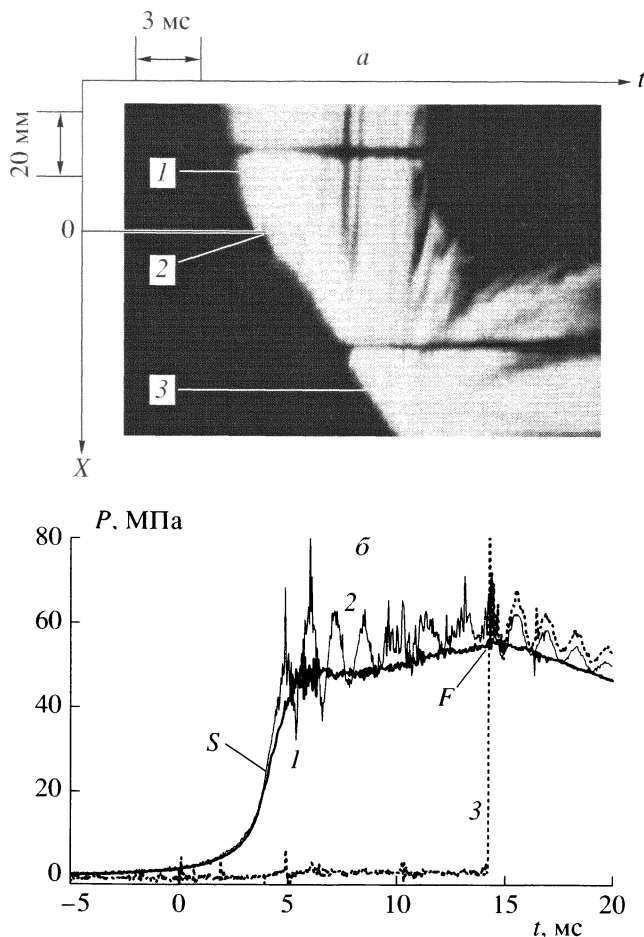
нии средней скорости конвективного горения. Наконец, в этой серии опытов следует обратить внимание на единственные в своем роде данные по конвективному горению прессованных зарядов чистого ПХА (опыты 70 и 73).

Влияние массы воспламенителя демонстрируется опытами 75, 87 и 54 в табл. 2 и на рис. 5, проведенными на смеси 44% АСД-4–56% ПХА (20 мкм). В этих опытах масса воспламенителя увеличилась от 1.5 до 6 г, что привело к увеличению давления, создаваемого воспламенителем, с 10 до ~75 МПа. В общем случае, при увеличении массы воспламенителя скорость конвективного горения и темп роста давления возрастают. Эффект воспламенителя объясняется не только более высоким давлением, при котором возникает и развивается конвективное горение, что, очевидно, благоприятно для горения. Еще одним фактором, приводящим к росту скорости конвективного горения, является то, что горение воспламенителя может продолжаться, накладываясь на конвективное горение и дополнительно поддерживая его, как это имеет место в опыте 54. Кроме того, газообразные продукты горения воспламенителя, содержащие кислород, могут участвовать в горении избытка алюминия, диспергированного в камеру бомбы, что приводит к увеличению и темпа роста, и уровня давления.

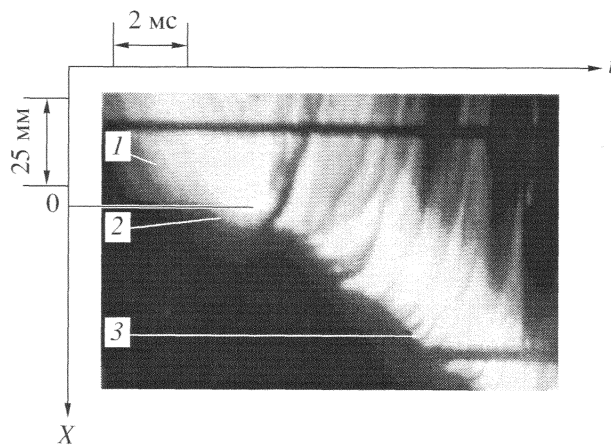
Эксперименты с добавкой полиметакрилата в количестве 2 и 4 вес. % проводили на смеси 44% АСД-4–56% ПХА (20 мкм) (опыты 57 и 58 в табл. 4). Эти опыты можно сопоставить с опытом 44 в табл. 2, который проводился на той же смеси без добавки органического горючего, правда, заряд в этом опыте имел вдвое большую длину. Очевидно, что добавка органического горючего не оказывает заметного влияния на характеристики конвективного горения.

*Сопловая установка*

В опытах, проводимых в сопловой установке, благодаря ресиверу с соплом темп роста давления в процессе конвективного горения был снижен в 10 и более раз по сравнению с манометрической бомбой. Пример щелевой фоторазвертки свечения и записей давления тремя датчиками для опыта 38 показан на рис. 6. Фоторегистрограмма более высокого качества, полученная в опыте 35, приведена на рис. 7. Исследуемый заряд занимает нижнюю часть фоторазвертки; до начала горения верхний торец заряда находился в точке  $X = 0$ . На фоторегистрограммах можно видеть, как на этот торец натекают светящиеся продукты горения воспламенителя, как происходит воспламенение и фронт свечения распространяется вдоль заряда. Фронт имеет неровную траекторию, что типично для фотографий конвективного горения порохов и взрывчатых веществ низкой пористо-



**Рис. 6.** Фотографическая и пьезометрическая регистрация в сопловой установке, опыт 38. *а)* Фоторегистрограмма: 0 – положение открытого торца заряда, 1 – продукты горения воспламенителя, 2 – начало конвективного горения, 3 – фронт конвективного горения на участке стабилизации. *б)* Записи давления: 1 – ресиверная камера, 2 – втулка над поверхностью заряда, 3 – дно заряда.



**Рис. 7.** Пример фотографической регистрации в сопловой установке, опыт 35. Обозначения те же, что на рис. 6а.

Таблица 5. Опыты в модельной сопловой установке. Смеси АСД-4-ПХА (20 мкм)

Опыт №	Состав, масса/длина/плотность/пористость (вес. %, г/мм/(г/см <sup>3</sup> )/%)	Масса воспламенителя*/диаметр сопла, г/мм	$P_S/P_F$ , МПа	$W_{AV}/W_{Ph}$ , м/с	$(dP/dt)_{AV}$ , МПа/мс	$t_{CB}$ , мс
23	28-72, 16.5/84.6/1.73/18	2 + 5 + 20/4.2	24/67.5	14.8/11.5	5.4	5.7
26	28-72, 14.2/72.2/1.74/17	2 + 5 + 25/6.0	30/53.4	6.25/14	0	11.55
22	28-72, 15.5/77.4/1.77/16	2 + 5 + 30/2.0	44/86.6	14.9/14	6.9	5.2
35	44-56, 15.3/73.7/1.84/17	3 + 5 + 25/6.0	23/57	9/9	4.4	8.3
34	44-56, 15.0/71.8/1.85/16	3 + 5 + 30/6.0	28/67	8.6/9.4	3.8	8.25
33	44-56, 15.1/70.7/1.89/15	3 + 5 + 40/6.0	50/82.5	11/14.5	3.8	6.4
37	21-79, 15.7/81/1.71/17	9 + 0 + 44/6.0	43/55	5.6/5.4	0	14.5
38	21-79, 14.9/77/1.72/17	9 + 0 + 34/6.0	23/56	7.4/8.4	1.4	10.4
41	21-79, 15.2/79/1.71/17	9 + 0 + 54/5.0	25/92	10.7/11.5	1.0	7.4
18	28-72 + 5% ПММА**, 9.7/52.2/1.65/18	2 + 4 + 10/3.0	16.5/32	7.5/7.6	2.2	6.9
16	28-72 + 5% ПММА, 9.4/49.5/1.68/18	2 + 5 + 20/3.0	32/50	8.5/8.0	2.8	5.9
17	28-72 + 5% ПММА, 9.4/49.7/1.68/18	3 + 5 + 30/3.0	45/65	10.7/9.6	1.7	4.7

\* Первая цифра обозначает массу ДРП-3, вторая – массу пироксилина и третья – массу пороха “Сокол” в составе воспламеняющей смеси.

\*\* ПММА – полиметаметилакрилат.

сти [4, 5]. Неоднородности фронта свечения имеют характерный размер в несколько миллиметров и продолжают за фронтом в виде отдельных треков. Эти треки, скорее всего, соответствуют горящим конгломератам, которые диспергируют и уносятся в камеру бомбы вместе с оттекающими газообразными продуктами горения. На траектории фронта, после непродолжительной начальной фазы, можно видеть несколько пульсаций, в которых скорость конвективного горения попеременно увеличивается и уменьшается, оставаясь, в среднем, примерно постоянной. Средняя скорость фронта свечения на этом участке принята в качестве фотографической скорости конвективного горения данного заряда ( $W_{ph}$ ). Погрешность ее измерения не превышает 10%.

Диаграммы давление–время, полученные тремя датчиками в опыте 38, приведены на рис. 6б. На кривой 1, которая получена датчиком, размещенным на стенке ресивера, можно выделить начальный подъем давления, вызванный горением воспламенителя, а также начало и конец распространения конвективного горения вдоль заряда, отмеченные стрелками с буквами  $S$  и  $F$  соответственно. После завершения стадии распространения давление в ресиверной камере спадает. Кривая 2, полученная датчиком давления в канале втулки над исследуемым зарядом, на начальном участке роста давления, вызванного горением воспламенителя, идет рядом с кривой 1. В точке  $S$  кривая 2 резко уходит вверх над кривой 1, реаги-

руя на интенсивное газообразование, вызванное горением заряда. Этот момент мы принимаем в качестве начала конвективного горения заряда. Затем возникают периодические колебания давления, продолжающиеся и после завершения стадии распространения конвективного горения. Кривая 3, полученная датчиком давления у закрытого торца заряда, после участка с нулевым сигналом демонстрирует почти вертикальный “взрыв”, который мы отождествляем с завершением стадии распространения конвективного горения (точка  $F$ ).

Колебания давления в канале втулки наблюдались во всех опытах и имели среднюю частоту 700–750 Гц. На стадии распространения конвективного горения амплитуда колебаний достигает 10 МПа и выше; очевидно, колебания связаны с пульсациями скорости фронта свечения на фоторегистрограммах. Если провести линию, усредняя пульсации кривой 2, то она пройдет выше кривой 1 примерно на 4–5 МПа. Это означает, что давление в канале втулки и, тем более, во фронте волны конвективного горения превышает давление в ресиверной камере. После завершения стадии распространения колебания давления плавно затухают по амплитуде, быстро приобретая синусоидальный характер.

Результаты измерений и информация о свойствах зарядов суммированы в табл. 5. В отличие от предыдущих таблиц, в ней приведены два значения скорости конвективного горения ( $W_{AV}$  и  $W_{ph}$ ), полученные обработкой фоторегистрограмм и диа-



грамм давление–время соответственно. В табл. 5 приведены четыре серии опытов, выполненных со смесями АСД-4 и 20-мкм ПХА на зарядах пористостью 15–18% с воспламенителями различной массы. Опыты 23, 26, 22 относятся к стехиометрической смеси; опыты 35, 34 и 33 – к смеси, содержащей 44% алюминия; опыты 37, 38 и 41 – к смеси с 21% алюминия, а опыты 18, 17 и 16 – к стехиометрической смеси АСД-4–ПХА с добавкой 5 вес. % полиметаметилакрилата.

Во всех проведенных опытах воспламенитель обеспечивал возникновение конвективного горения без участка послойного горения. При варьировании мощности воспламенителя средний уровень давления в ресивере на стадии горения заряда изменялся в диапазоне от 30 до 70 МПа. Опыты демонстрируют общую тенденцию повышения среднего давления в ресивере с ростом скорости конвективного горения. Однако для получения количественной оценки этого эффекта в виде показателя степени по давлению в законе скорости конвективного горения для каждой смеси имеющихся данных недостаточно. При введении 5% органического горючего в стехиометрическую смесь, а также при уменьшении содержания алюминия до 21% скорость конвективного горения снижается. По сравнению с опытами в манометрической бомбе, скорость конвективного горения в сопловой установке оказалась ниже в ~1.5 раза, что, скорее всего, объясняется существенно меньшим темпом роста давления.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Численное моделирование проводили с помощью компьютерной программы, которая была разработана нами ранее и подробно представлена в [3]. Теоретическая модель рассматривает конвективное горение смеси алюминия с дисперсным окислителем (в данном случае – ПХА) на основе одномерных уравнений механики многофазных реагирующих сред. Модель наряду с обычными свойствами конвективного горения (фильтрация продуктов горения в поры заряда, конвективная передача тепла от фильтрующих газов к поверхности пор, нагрев, воспламенение и горение, а также движение энергетического материала в результате диспергирования под действием возникающих перепадов давления) учитывает также эффекты от присутствия алюминия.

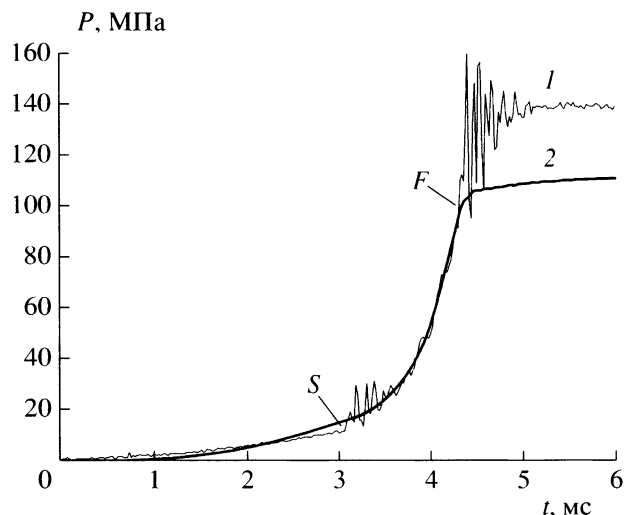
Упрощающие положения, использованные в модели, частично обязаны ограниченности наших знаний о протекающих процессах, частично – стремлению сократить число входных параметров задачи, особенно тех, для определения которых отсутствует необходимая экспериментальная информация. Наибольшие трудности связаны с

описанием всех аспектов воздействия алюминия на структуру заряда, воспламенение и горение ПХА. Предполагается, что химическое превращение проходит в две экзотермические стадии: горение ПХА и последующее горение алюминия в продуктах горения ПХА. Скорости реакций выражены с помощью феноменологических законов скорости горения: для ПХА в виде степенной зависимости от давления с показателем степени, равным 1, и скоростью 4 см/с при 100 МПа. Переход от инертного нагрева к горению происходит при достижении соответствующих температур воспламенения, которые приняты константами. Для ПХА температуру воспламенения приняли равной 850 К.

С учетом [6–9] скорость горения алюминия представлена в виде степенной зависимости от диаметра частиц алюминия (с показателем степени, равным 1.5) и концентрации окисляющих газов (с показателем степени, равным 1). В качестве начального диаметра частиц использовали значения, вычисляемые по номинальной удельной поверхности соответствующего порошка. Константа скорости горения взята из экспериментальных данных по горению частиц алюминия в продуктах горения ракетных топлив [6] и умножена на 3, чтобы учесть более высокую активность кислорода, образующегося при горении ПХА, по сравнению с продуктами горения ракетного топлива (пары воды и диоксид углерода) [8, 9]. Учитывая, что при горении ракетных топлив тонкодисперсный алюминий воспламеняется на поверхности горения топлива [6], в качестве температуры воспламенения алюминия выбрали температуру его плавления 943 К.

Конденсированный продукт горения алюминия – оксид алюминия образуется в виде тонкодисперсных частиц, которые переносятся вместе с газовой фазой. Теплофизические параметры газовой фазы приняты независимыми от температуры, давления и состава продуктов горения. Значения соответствующих констант, а также теплоты сгорания ПХА и алюминия и начальные концентрации окисляющих газов в продуктах горения ПХА выбирали по результатам термодинамических расчетов. Эти расчеты проводили с помощью программы TDS [10] для задач горения смесей ПХА и алюминия при постоянном давлении и при постоянном объеме.

Горение воспламенителя представлено в модели упрощенно с помощью функции гауссова типа, задающей изменение во времени интенсивности выделения массы горячих газов, образующихся при его сгорании. По мере сгорания воспламенителя рост давления в бомбе вызывает фильтрацию горячих газов в поры заряда, нагревая поверхность пор и инициируя горение заряда с открытого торца. Указанная функция включает



**Рис. 8.** Численное моделирование; диаграмма давление–время для базового варианта и сравнение с экспериментом: 1 – опыт 64, 2 – расчетный вариант S64E.

три коэффициента. Их величина подбирается так, чтобы расчетная диаграмма по темпу роста и уровню давления находилась в согласии с экспериментальной диаграммой, полученной в тех опытах, где конвективное горение началось с задержкой после сгорания воспламенителя либо где воспламенитель сжигался в отсутствие заряда.

Газопроницаемость заряда (диаметр пор) определяется средним диаметром частиц ПХА и пористостью заряда по формулам идеальной пористой среды. Хотя при изготовлении зарядов прессованием размер частиц ПХА мог изменяться из-за дробления частиц крупных фракций (75 и 200 мкм), а диаметр пор отличаться от значений, определяемых формулой, использованной в модели, отсутствие дополнительных экспериментальных данных не позволяло нам вносить какую-либо коррекцию.

Частицы алюминия, существенно уступая частицам ПХА по размерам, могут как собираться в отдельные конгломераты, располагаясь между соседними частицами ПХА, так и окружать каждую частицу ПХА тонким слоем. Алюминий обладает высокой теплопроводностью и способен эффективно отбирать значительную долю тепла, поставляемого к поверхности пор конвективной теплопередачей, затрудняя тем самым нагрев и воспламенение ПХА. Два параметра, с помощью которых этот эффект учитывается в данной модели: толщина указанного слоя ( $h_{Al}$ ) и доля теплового потока, отводимого в конгломераты, в отсутствие дополнительных экспериментальных данных относительно структуры заряда не могут быть выбраны надежно и фактически использовались в качестве подгоночных параметров. Соответ-

ственно, теоретический анализ задачи проводился следующим образом. Вначале для конкретного опыта, выполненного в манометрической бомбе, варьируя указанные подгоночные параметры, мы определили базовый набор входных параметров задачи, который обеспечивал приемлемое согласие расчетов с экспериментом по максимальному темпу роста давления и средней скорости конвективного горения. Затем, используя этот базовый набор входных параметров, мы проводили серию расчетов, варьируя лишь те параметры, которые изменялись в экспериментах. Последующий анализ результатов численного моделирования и сопоставление с экспериментальными данными позволили уточнить представления о действующих механизмах и причинах наблюдаемых закономерностей.

Еще одно дополнение в модель было внесено по результатам предварительных расчетов. Они показали, что под действием воспламенителя конвективное горение возникало с гораздо меньшей задержкой, чем это наблюдалось в опытах, и при давлениях, которые были ниже экспериментального давления срыва послойного горения. Мы не будем здесь рассматривать возможные причины, по которым реальная задержка воспламенения заряда оказывается дольше расчетной. Такой анализ выходит за рамки данной работы. Хотя конвективное горение, возникнув, быстро “забывает” начальные условия, тем не менее для того, чтобы в расчетах конвективное горение началось при том же давлении, что и в эксперименте, в модель был введен дополнительный переключатель, который исключал проникновение горения в поры до достижения заданного давления.

Результаты моделирования суммированы в табл. 6. Для удобства сопоставления с экспериментальными данными информация представлена почти в той же форме, что и в табл. 1–5. Лишь в столбце с данными скорости конвективного горения помимо средней величины ( $W_{AV}$ ) приведены значения начальной ( $W_S$ ) и максимальной ( $W_{max}$ ) скоростей, и в последнем столбце дано значение максимальной скорости, с которой газы втекают в поры ( $U_g$ )<sub>m</sub>.

На рис. 8 приведены расчетная и экспериментальная диаграммы давление–время для опыта 64, который был выбран в качестве базового. Кроме того, для этого варианта на рис. 9 (кривая 1) приведена траектория фронта конвективного горения, а на рис. 10 – пространственные профили давления в различные моменты времени по длине заряда. Расчет (вариант S64E в табл. 6) проведен при нулевой толщине слоя  $h_{Al}$  и доле теплового потока, отводимого в конгломераты, равной 0.65. Эти значения подгоночных параметров отвечают ситуации, когда алюминий не оказывает сильного действия на воспламенение ПХА. Конвективное

Таблица 6. Численное моделирование

№ варианта	Состав, длина/плотность/пористость (вес. %, мм/(г/см <sup>3</sup> )/%)	$P_S/P_F/P_{max}$ , МПа	$W_S/W_{max}/W_{A1}$ , м/с	$(dP/dt)_m$ , МПа/мс	$t_{CB}$ , мс	$(U_g)_m$ , м/с
S64E	28 АСД-4-72 ПХА (20 мкм), 27.3/1.75/17	17.3/86.5/112	8.7/47/25	137	1.1	50
S66A	28 АСД-4-72 ПХА (20 мкм), 28/1.86/12	20/112/125	3.7/22.5/12.5	71	2.23	25
S82M	28 АСД-4-72 ПХА (75 мкм), 27/1.75/17	22.8/65.3/103	11/79.4/25.5	128	1.06	76
S83M	28 АСД-4-72 ПХА (200 мкм), 27/1.75/17	23/48.2/100	19/60/32	67	0.84	45
S89M	10 АСД-4-90 ПХА (20 мкм), 27/1.69/17	17.5/80.5/87	4.7/22.5/10.8	42.6	2.5	24
S23S*	28 АСД-4-72 ПХА (20 мкм), 27/1.75/16	55/63/65	6.7/40.4/12.3	3.7	2.2	45
S23L*	28 АСД-4-72 ПХА (20 мкм), 80/1.75/16	55/73/75	6.7/39/24	6.4	3.3	45
S31M	21 АСД-4-79 ПХА (20 мкм), 27/1.84/17	19/91/103.5	5/39/16	96	1.7	41
S78M	44 АСД-4-56 ПХА (20 мкм), 27/1.72/17	23/103/127	6/57.4/20	177	1.36	62
S86J	28 ПАП-2-72 ПХА (20 мкм), 20.0/1.75/17	36/70/-	0.8/1.0/-	4.9	3.5	6
S92M	28 АСД-1-72 ПХА (20 мкм), 27.3/1.75/17	19.5/98/120	3.9/12.6/7.2	31.4	3.64	13

\* Объем камеры увеличен до 1200 см<sup>3</sup>.

горение стартует со скоростью ~9 м/с, на второй половине заряда горение ускоряется, и скорость возрастает до 47 м/с. Пространственная структура волны горения была подробно рассмотрена в [3]. Отметим лишь, что, как видно на рис. 10, дав-

ление во фронте волны заметно превышает давление в бомбе. Расчетные значения средней скорости конвективного горения и максимального темпа роста давления находятся в согласии с экспериментом. Входные параметры этого варианта

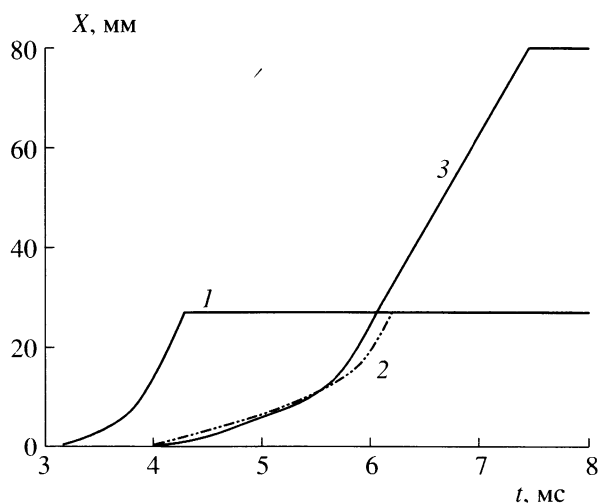


Рис. 9. Численное моделирование: пример траектории фронта конвективного горения: 1 – вариант S64E, 2 – вариант S23S, 3 – вариант S23L.

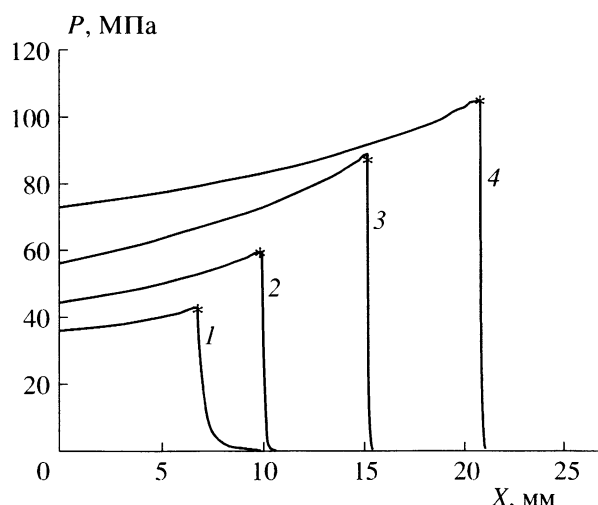


Рис. 10. Численное моделирование, вариант S64E: профили давления  $P(X)$  в различные моменты времени (мс): 1 – 3.77, 2 – 3.90, 3 – 4.02, 4 – 4.15. Звездочкой отмечено положение фронта пламени.

были взяты за основу при последующих расчетах, в которых было рассмотрено влияние параметров, варьируемых в эксперименте.

Сравнение вариантов S64E и S66A дает представление о влиянии пористости заряда. Видно, что при уменьшении пористости с 17 до 12% расчетные значения скорости конвективного горения и темпа роста давления снижаются вдвое. Тенденция совпадает с экспериментальной, однако расчетный эффект в указанном диапазоне пористости оказался сильнее, чем в эксперименте.

Серия вариантов S64E, S82M и S83M демонстрирует влияние размера частиц ПХА. Видно, что при увеличении размера частиц ПХА от 20 до 200 мкм средняя скорость конвективного горения несколько возрастает, а темп роста давления снижается. Эффект не противоречит экспериментальным наблюдениям и объясняется увеличением газопроницаемости заряда при одновременном уменьшении удельной поверхности горения частиц ПХА.

Серия вариантов S89M, S31M, S64E и S78M дает представление о влиянии соотношения компонентов смеси. Как видно, при увеличении содержания алюминия в смеси скорость конвективного горения максимальна для стехиометрической смеси, тогда как темп роста давления демонстрирует монотонное увеличение. Эффект находится в согласии с экспериментальными наблюдениями и отражает изменение энергетического потенциала смеси.

Сравнение вариантов S92M и S64E демонстрирует снижение характеристик конвективного горения при замене алюминия марки АСД-4 на более крупный алюминий АСД-1. Эффект целиком обязан снижению скорости горения частиц алюминия. Отсутствие аналогичного эффекта в эксперименте можно рассматривать как свидетельство того, что заряды с мелким и более крупным алюминием сферической формы, скорее всего, сильно различаются по поровой структуре, что оказывает более сильное влияние на характеристики конвективного горения, чем снижение скорости горения частиц алюминия.

В вариантах S23S и S23L объем камеры сгорания был увеличен до 1100 см<sup>3</sup>. Это позволило изучить влияние темпа роста давления в камере сгорания, который по сравнению с вариантом S64E снизился в десятки раз до уровня, реализованного в опытах в сопловой бомбе. Результаты расчетов приведены в табл. 6, а также на рис. 9, где показаны расчетные траектории фронта пламени. Сравнивая варианты S23S и S64E, можно видеть, что при одинаковых параметрах заряда снижение темпа роста давления, равносильное переходу от манометрической бомбы к сопловой установке, приводит к тому, что конвективное горение стартует с более низкой скоростью и медленнее ускоряет-

ся, распространяясь по длине заряда. Как следствие, средняя скорость конвективного горения снижается примерно вдвое. При удлинении заряда до 80 мм (см. вариант S23L) процесс в начальной фазе развивался так же, как и в случае короткого заряда. Однако затем ускорение прекращалось, и на большей части длины заряда конвективное горение протекало с постоянной скоростью. Хотя эти результаты качественно согласуются с экспериментом, отметим, что расчетные значения скорости конвективного горения оказались заметно выше экспериментальных, полученных на зарядах такой же длины в сопловой установке.

Наконец, вариант S86J демонстрирует наши попытки воспроизвести эффект, наблюдаемый в эксперименте при замене сферического алюминия на чешуйчатый. Расчет проведен при значении подгоночного параметра  $h_{Al} = 0.86$  мкм и диаметре горящих частиц алюминия, равном 18 мкм. Это отвечает предположению, что чешуйки алюминия окружают 20-мкм частицы ПХА сплошным слоем и что имеет место процесс агломерации чешуек алюминия. После воспламенения заряда конвективное горение стартует со скоростью ~1 м/с. Затем скорость конвективного горения падает из-за заполнения пор перед фронтом пламени холодными продуктами горения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено конвективное горение смесей перхлората аммония с алюминием в зарядах пористостью 7–18%, изготовленных прессованием. Эксперименты проводились при давлениях до 300 МПа в манометрической бомбе с записью кривой давление–время и в установке с соплом, в которой использовалась фотографическая и пьезометрическая методики регистрации. Ранее данные аналогичного вида были получены на смесях перхлората аммония с алюминием в зарядах насыпной плотности и обнаружили высокую взрывоопасность. Наше исследование показало, что, в отличие от зарядов насыпной плотности, конвективное горение прессованных зарядов распространяется без существенного ускорения, с умеренными скоростью и темпом роста давления в бомбе.

По результатам исследования определены факторы, которые позволяют эффективно воздействовать на характеристики конвективного горения. К ним относятся форма частиц алюминия (при замене порошка с частицами сферической формы на пудру с частицами в форме тонких чешуек с близкой удельной поверхностью скорость конвективного горения снижается более чем на порядок), соотношение компонентов смеси и пористость заряда. Изменение размера частиц перхлората аммония и мощности воспламенителя, а также добавка органического горючего оказывают более слабый эффект.

Опыты в сопловой установке, где с помощью ресивера с соплом темп роста давления в процессе горения был снижен в 10 и более раз по сравнению с манометрической бомбой, показали, что конвективное горение исследуемых смесей может распространяться без существенного ускорения, сохраняя примерно постоянную скорость, на зарядах увеличенной длины. При этом скорость конвективного горения из-за более низкого темпа роста давления оказалась примерно в полтора раза ниже, чем в опытах в манометрической бомбе с аналогичными смесями. С помощью датчиков давления, которые размещались в различных местах установки, показано, что давление во фронте волны конвективного горения заметно превышает давление в ресиверной камере, куда оттекают продукты горения и диспергируемые частицы горящей смеси.

Численное моделирование проводилось с помощью компьютерной программы, разработанной нами ранее, и преследовало цель проверить эффективность модели процесса и получить дополнительные данные для объяснения закономерностей, обнаруженных экспериментально. Трудности теоретического анализа связаны прежде всего с отсутствием надежных данных о влиянии алюминия на структуру пористого заряда, а также на воспламенение и горение ПХА. Расчеты, которые были проведены с допущением, что частицы алюминия на поверхности пор не препятствуют эффективной передаче тепла от нагретых газов к частицам ПХА, согласуются с экспериментальными данными для смесей со сферическим алюминием как по уровню скорости конвективного горения и темпу роста давления, так и по характеру наблюдаемых зависимостей. Что касается эффекта резкого уменьшения скорости конвективного горения, наблюдаемого при замене сферического алюминия на чешуйчатый, то его удалось качественно воспроизвести, предположив, что чешуйки алюминия обволакивают ча-

стицы ПХА, изолируя их от прямого контакта с горячими газами и затрудняя их нагрев и воспламенение.

Исследованные составы и полученные результаты представляют интерес для разработки зарядов конвективного горения к импульсным двигателям, термо- и газогенераторам различного назначения со временами работы в диапазоне от миллисекунд до нескольких десятков миллисекунд. Теоретическая модель после некоторого усовершенствования может быть использована при оптимизации режима работы указанных зарядов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 03-03-32060) и Отделением химии и наук о материалах РАН (программа № 5).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев К.К., Рогожников В.М. Теория взрывчатых веществ. М.: Высш. шк., 1967. С. 163.
2. Андреев К.К., Рогожников В.М. Теория взрывчатых веществ. М.: Высш. шк., 1967. С. 176.
3. Ермолаев Б.С., Беляев А.А., Сулимов А.А. // Хим. физика. 2005. Т. 24. № 1. С. 879.
4. Сулимов А.А., Ермолаев Б.С. // Хим. физика. 1997. Т. 16. № 9. С. 51.
5. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Фотеенков В.А. и др. // Физика горения и взрыва. 1980. № 3. С. 24.
6. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972.
7. Dokhan A., Price E.W., Seitzman J.M. et al. // 39<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. July 20–23, 2003. Huntsville. Al. USA.
8. Servaites J., Krier H., Melcher J.C. et al. // Combustion and Flame. 2001. V. 125. P. 1040.
9. Малинин В.И., Коломин Е.И., Антипин И.С. // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35. № 1. С. 41.
10. Викторов С.Б. Компьютерная программа термодинамических расчетов TDS. М.: Изд-во ИФГУ, 2000.