

## ВЛИЯНИЕ ОКТОГЕНА НА МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ БАЛЛИСТИТНЫХ ПОРОХОВ

УДК 536.46

А. А. Зенин, С. В. Финяков, В. М. Пучков,  
Н. Г. Ибрагимов, Э. Ф. Охрименко

Институт химической физики РАН, 117977 Москва

*Экспериментально найдены основные параметры волн горения баллиститных порохов с добавками октогена при давлениях 20, 50 и 100 атм. Показано, что добавки октогена уменьшают скорость горения, температуру поверхности, тепловыделение в реакционном слое конденсированной фазы и скорость тепловыделения в газе вблизи поверхности. Показано, что эти добавки увеличивают интенсивность высокотемпературных газовых реакций, что ведет к сокращению протяженности зоны газофазного реагирования. Установлено, что для октогеносодержащих баллиститных составов справедливы три первых объединенных закона для параметров зон горения, найденные ранее для простых баллиститных порохов (нитроклетчатка — нитроглицерин). Это — закон газификации, связывающий скорость горения с температурой горячей поверхности, закон тепловыделения в к-фазе, связывающий относительное тепловыделение в к-фазе с параметром  $p/m^{1/2}$ , и закон теплоотвода из газа. Справедливость объединенных законов для октогеносодержащих баллиститных составов показывает, что горение этих порохов контролируется баллиститными компонентами.*

Один из путей повышения энергетики баллиститных порохов — введение в двухосновную систему (нитроклетчатка — нитроглицерин) циклических нитроаминов, и прежде всего — октогена. Обладающий большой теплотой сгорания ( $Q_V = 1440$  кал/г), октоген имеет также ряд других преимуществ: большое газовыделение, высокий удельный импульс, нетоксичные и малокоррозионные продукты сгорания [1, 2]. Установлено, что увеличение содержания нитроаминов (октогена и гексогена) в баллистном порохе ведет к уменьшению скорости горения [3–10]. В [6–11] показано, что зависимость скорости горения октогеносодержащих порохов от дисперсности октогена имеет  $S$ -образный характер, подобно зависимости для перхлоратных смесевых композиций. Плавление нитроаминов в конденсированной фазе волны горения нитроаминных составов играет, по-видимому, важную роль в механизме горения этих порохов [8].

Интерес к нитроаминным баллиститным порохам имеет еще один аспект, связанный с трудностью подбора катализаторов для чистого октогена и систем октоген — полимерная связка [12]. Исследование горения октогена в двухосновных системах решает проблему модификации скорости горения твердого топлива, так как для баллиститных составов существует достаточное количество модификаторов скорости горения [10, 12].

Действие добавок в волне горения конденсированных систем представляется весьма сложным явлением, проявляющимся во всех зонах горения, причем по-разному при изме-

нении внешних условий (давления, начальной температуры). В настоящей работе предлагается исследование механизма горения октогенсодержащих порохов на основе анализа особенностей термической структуры зон стабильного горения.

Изучались пороха с различными содержанием и дисперсностью октогена. Предпринята также попытка определить влияние плавкости компонентов посредством дополнительного введения в октогенсодержащий порох легкоплавкого линейного нитроаминна с температурой плавления 52 °С. Термическая структура волн горения (температурные и тепловые параметры волн) выбранных составов исследовалась с помощью микротермопарной методики, позволяющей находить температурные профили волн горения [13–16]. По этим профилям проводился трехэтапный анализ. На первом этапе оценивалось влияние изменений состава пороха на скорость горения и характер температурных профилей: их протяженность, крутизну, температуру зон горения. На втором этапе находились изменения тепловых характеристик волны (тепловых эффектов в к-фазе и газовой фазе, тепловых потоков между зонами). На третьем этапе проводился анализ полученных данных с помощью обобщенных закономерностей для параметров зон горения баллистических порохов, опубликованных в [14, 17–19]. В данной работе исследовалось также влияние нитроаминов на обобщенные законы газификации, тепловыделения в к-фазе и теплоподвода из газа в к-фазу.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Микротермопарная методика.** Использовались микротермопары из сплавов вольфрама с рением ( $W + 20\%Re$  —  $W + 5\%Re$ ) толщиной от 3,5 до 7 мкм, получаемые из сваренных проволок диаметром 15–30 мкм посредством прокатки на вальцах. Ленточные термопары имели П-образную форму для уменьшения теплотерь от термоспая в концы термопары. Теория термопарных измерений и методические эксперименты показали, что для минимизации ошибок измерений толщина термопары должна быть как минимум в 5 раз меньше толщины теплового слоя к-фазы, а величина горизонтального участка П-образной термопары должна быть в 50–100 раз больше ее толщины. Термопары заделывались по 2–3, одна под другой, с расстоянием в 2–3 мм в цилиндрические образцы пороха диаметром 10 мм с помощью ацетона, который затем удалялся сушкой. Шашки бронировались по боковой поверхности раствором нитролинолеума в ацетоне. Опыты проводились в атмосфере азота в бомбе постоянного давления объемом 2 л. Термопарные сигналы записывались на фотобумагу шлейфового осциллографа при скорости протяжки 500–2500 мм/с. Осциллограммы перестраивались в профили температура — координата, поскольку изучались режимы стабильного горения. Скорость горения определялась по временному интервалу между термопарными записями и по расстоянию между термопарами в исследуемом образце пороха. В каждом режиме горения получалось 5–10 профилей температуры, которые затем осреднялись, чтобы исключить случайные ошибки измерений. Детали методики приведены в [14], и там же показано, что для многих конденсированных горючих систем справедлив одномерный подход и квазистационарное приближение при обработке термопарных профилей.

**Методика обработки температурных профилей.** Температурные профили несут информацию о тепловых процессах в волнах горения. Специальная обработка профилей позволяла получать тепловые потоки из газа в к-фазу за счет теплопроводности, а

также тепловыделение в реакционном слое к-фазы, распределение скорости тепловыделения по зонам горения [13, 14]. При необходимости лучистый теплоподвод  $q_r$  от пламени в к-фазу измерялся микрокалориметрами. Для получения значений тепловыделения и тепловых потоков за счет теплопроводности используются первые производные температуры по координате в отдельных точках профиля (в основном вблизи поверхности горения пороха). Для получения скоростей тепловыделения существует расчетная методика [20]. Применяются и вторые производные температуры по координате, однако в данной работе будем пользоваться лишь значениями скорости тепловыделения в газе вблизи горячей поверхности, для нахождения которой достаточно первой производной (поскольку, как показывают оценки, второй производной вблизи поверхности можно пренебречь).

Теплоподвод из газа в к-фазу теплопроводностью находится по формуле

$$q = -\lambda_1(T) \cdot \varphi/m.$$

Здесь  $\lambda_1$  — коэффициент теплопроводности газа;  $\varphi = (dT/dx)$  — градиент температуры в газе вблизи поверхности;  $m$  — массовая скорость горения.

Тепловыделение в реакционном слое к-фазы определяется выражением

$$Q = c(T_s - T_0) - q - q_r + q_m, \quad (1)$$

где  $T_s$ ,  $T_0$  — температура горячей поверхности и начальная температура пороха соответственно;  $c$  — удельная теплоемкость к-фазы;  $q_m$  — удельная теплота плавления. В исследуемых системах  $q_r = q_m \cong 0$ . Скорость тепловыделения в газе вблизи поверхности

$$\Phi \cong c_p \varphi m.$$

Следует отметить, что температуры различных участков волны горения порохов измеряются с различной точностью. С максимально возможной точностью ( $\sim 10\%$ ) получаются распределения температуры в к-фазе и в газе вблизи поверхности (где также существуют методы улучшения точности измерений, см., например, [14, 16]). Именно поэтому точность определения  $T_s$ ,  $Q$  и  $q$  составляет  $10\%$ . Температура газовой фазы вдали от горячей поверхности измеряется обычно со значительными погрешностями вследствие ограниченных размеров образца пороха и бомбы. Поэтому невозможно организовать процесс горения так, чтобы он имел одномерный характер. Подмешивание холодного газа к реагирующей горячей струе искажает тепловую картину и снижает среднюю температуру газа. Если же протяженность зоны газофазного реагирования превышает диаметр образца, то высокотемпературные стадии газофазного процесса вообще могут не реализоваться. Так, например, зона высокотемпературного пламени баллистических порохов исчезает при давлениях  $p \leq 20$  атм, поскольку уже при  $p = 20-30$  атм расстояние до этого пламени составляет 5–7 мм (т. е. сопоставимо с диаметром образцов пороха, которые можно изучать в бомбе постоянного давления). Однако это обстоятельство несущественно при изучении механизма горения, так как основные процессы, определяющие скорость горения, протекают вблизи горячей поверхности (см. [14]). Из вышесказанного ясно, что неискаженная картина температурного распределения в газе должна получаться в центре шашки для расстояний, меньших ее диаметра.

**Механизм горения базового состава.** Типичный двухосновный порох, содержащий  $\sim 48\%$  нитроцеллюлозы,  $47\%$  нитроглицерина и  $5\%$  технологических добавок взят в качестве базового состава, на котором изучалось действие нитроаминовых добавок. Калорийность пороха  $Q_V = 1180$  кал/г, температура второго пламени  $T_f = 2680$  °С. Темпера-

Таблица 1

$p$ , атм	$m$ , г/(см <sup>2</sup> · с)	$T_s$ , °С	$\varphi \cdot 10^4$ , К/см	$q$ , кал/г	$Q$ , кал/г	$T_1$ , °С	$T_f$ , °С	$L_1$ , мм	$L$ , мм	$\delta$	$\Delta_1$	$\Delta$	$\Phi_0$ , ккал/(см <sup>3</sup> · с)
20	1,12	40 4	14	20,9	113,5	1400	—	—	2,5	2,7	230	—	58
50	1,65	44 2	20	21,7	126	1950	2680	1,0	4,0	2,75	54	176	125
100	4,95	57 5	45	20,0	174,2	—	2680	—	3,4	4,7	—	451	850

Примечание. Относительная толщина первого пламени  $\Delta_1 = L_1/L_{k1}$ , где  $L_{k1} = \lambda_1(T_1)/(c_1(T_1) \cdot m)$  — кондуктивный размер первого пламени; относительная толщина реагирующей газовой фазы  $\Delta = L/L_k$ , где  $L_k = \lambda_1(T_f)/(c_1(T_f) \cdot m)$  — кондуктивный размер второго пламени; относительная толщина теплового слоя к-фазы  $\delta = l/(\lambda/(cm))$ , где  $l$  — размерная толщина теплового слоя; прочерк — параметры не определены.

турные профили и скорости горения измерялись при  $p = 20, 50$  и  $100$  атм и  $T_0 = +20$  °С. На рис. 1–3 представлены осредненные температурные профили волн горения. Волна горения базового состава имеет типичное строение: газовая фаза состоит из двух зон — темной и высокотемпературной. При  $p = 20$  атм горячее пламя отсутствует из-за теплопотерь в протяженном первом пламени. При  $p = 100$  атм зоны сливаются в одну. Термодинамическая расчетная температура  $2680$  °С достигается при  $p \approx 50$  атм. В табл. 1 представлены параметры зон, рассчитанные при следующих исходных данных:  $c = 0,36$  кал/(г · К),  $c_p = 0,46 - 81,89/T$  ( $T$ , К);  $\rho = 1,65$  г/см<sup>3</sup>. Из табл. 1 видно, что протяженность темной зоны  $L_1$  быстро сокращается с ростом давления; уменьшается и общая протяженность  $L$  зоны газозонных реакций. Однако эти размеры намного превышают кондуктивные размеры этих зон (см. значения  $\Delta_1$  и  $\Delta$ ), что указывает на огромное тепловое сопротивление области между горячим пламенем (или пламенем темной зоны) и горячей поверхностью. Это сопротивление исключает кондуктивное воздействие пламени на скорость горения (вклад излучения незначителен), что дает основание говорить о решающем влиянии процессов в к-фазе и в приповерхностной области газа на скорость горения пороха (и всех подобных двухосновных порохов). Относительный размер  $\delta$  теплового слоя к-фазы не намного превышает единицу, если учесть, что точная величина температуропроводности к-фазы  $\chi$  в этом слое неизвестна (можно лишь утверждать, что она заведомо выше, чем при  $T_0$  (см. [14])). Скорее всего, полученные значения  $\delta$  должны использоваться для оценки действительной величины  $\chi$  в тепловом слое к-фазы волны горения баллистических порохов. Сказанное выше означает, что зону реакции в реакционном слое к-фазы можно считать узкой. Представленные в табл. 1 значения  $\Phi_0$  свидетельствуют о высокой приповерхностной скорости тепловыделения, которая быстро возрастает с ростом давления и достигает при  $p = 100$  атм значения  $0,85 \cdot 10^6$  кал/(см<sup>3</sup> · с).

### ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ОКТОГЕНА НА СТРУКТУРУ ЗОН ГОРЕНИЯ

Исследовались три рецептуры пороха с добавкой октогена  $g = 10, 20$  и  $30$  % по массе (сверх  $100$  %) к базовому составу. Данные табл. 2 отражают изменение параметров волны горения, вызванное введением добавки, по отношению к базовому варианту. Прежде всего, добавки октогена снижают скорость горения, причем с увеличением  $g$ , как правило,

Таблица 2

$p$ , атм	$\Delta t$ , г/(см <sup>2</sup> · с)	$\Delta T_s$ , К	$\Delta q$ , ккал/г	$\Delta Q$ , ккал/г	$\Delta \Phi_0$ , ккал/(см <sup>3</sup> · с)	$\Delta L$ , мм
$g = 10\%$						
20	-0,336	-31	-2,4	-85	-32	—
50	-0,165	-11	-7	-3	-57	-2,07
100	-2,89	-110	-7	-31,5	-74	-1,4
$g = 20\%$						
20	-0,42	-40	-1,7	-12,3	-36	—
50	-0,25	-17	-4,0	-2,0	-59	-2,28
100	-2,31	-82	-3,7	-30,8	-640	-2,15
$g = 30\%$						
20	-0,526	-53	1,8	-8,5	-41	—
50	-0,49	-35	3,9	-16,2	-52	-2,28
100	-2,475	-89	7,1	-38,2	-533	-2,15

значение  $t$  убывает, что соответствует литературным данным (см. введение). Измерения параметров зон показывают, что добавка октогена всегда уменьшает температуру поверхности, тепловыделение в к-фазе и особенно сильно значение  $\Phi_0$  при увеличении  $p$  и  $g$ . Теплоподвод из газа уменьшается также при введении 10 и 20 % октогена, однако уже при  $g = 30\%$  величина  $q$  начинает возрастать и тем сильнее, чем выше давление. С введением октогена протяженность реагирующей газовой фазы падает, что указывает на увеличение интенсивности реакций в основном объеме газовой фазы (начиная с некоторой температуры). Приведенный анализ показывает, что в реакционном слое к-фазы и в газе вблизи поверхности октоген частично подавляет тепловыделение, что и является причиной уменьшения скорости горения пороха (см. значения  $Q$  и  $\Phi_0$ ). В основном объеме газовой фазы октоген стимулирует тепловыделение вследствие высокой собственной теплотворной способности, что вызывает рост  $q$  при  $g = 30\%$  (однако увеличение  $q$  в этом случае не компенсирует падения  $Q$ , что и ведет к уменьшению скорости горения даже при  $g = 30\%$ ).

Некоторые из обнаруженных эффектов демонстрируют также рис. 1, 2. Видно, что с ростом добавки октогена высокотемпературная часть газовой фазы приближается к поверхности, что свидетельствует об интенсификации газофазного процесса в основном объеме газовой фазы. Рис. 1 отчетливо показывает уменьшение градиента температуры вблизи поверхности при увеличении добавки октогена, что ведет к падению  $q$ . Интенсификация газофазных реакций начинается с температуры  $\approx 1200$  и  $\approx 1500$  °С при  $p = 20$  и 50 атм соответственно, а при 100 атм эта температура быстро снижается с увеличением  $g$  (начиная с  $\sim 1600$  °С для  $g = 10\%$ ).

### ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ ОКТОГЕНА

С целью исследования взаимодействия частиц октогена с компонентами баллиститного пороха в реакционном слое к-фазы были приготовлены два пороха с разными размерами

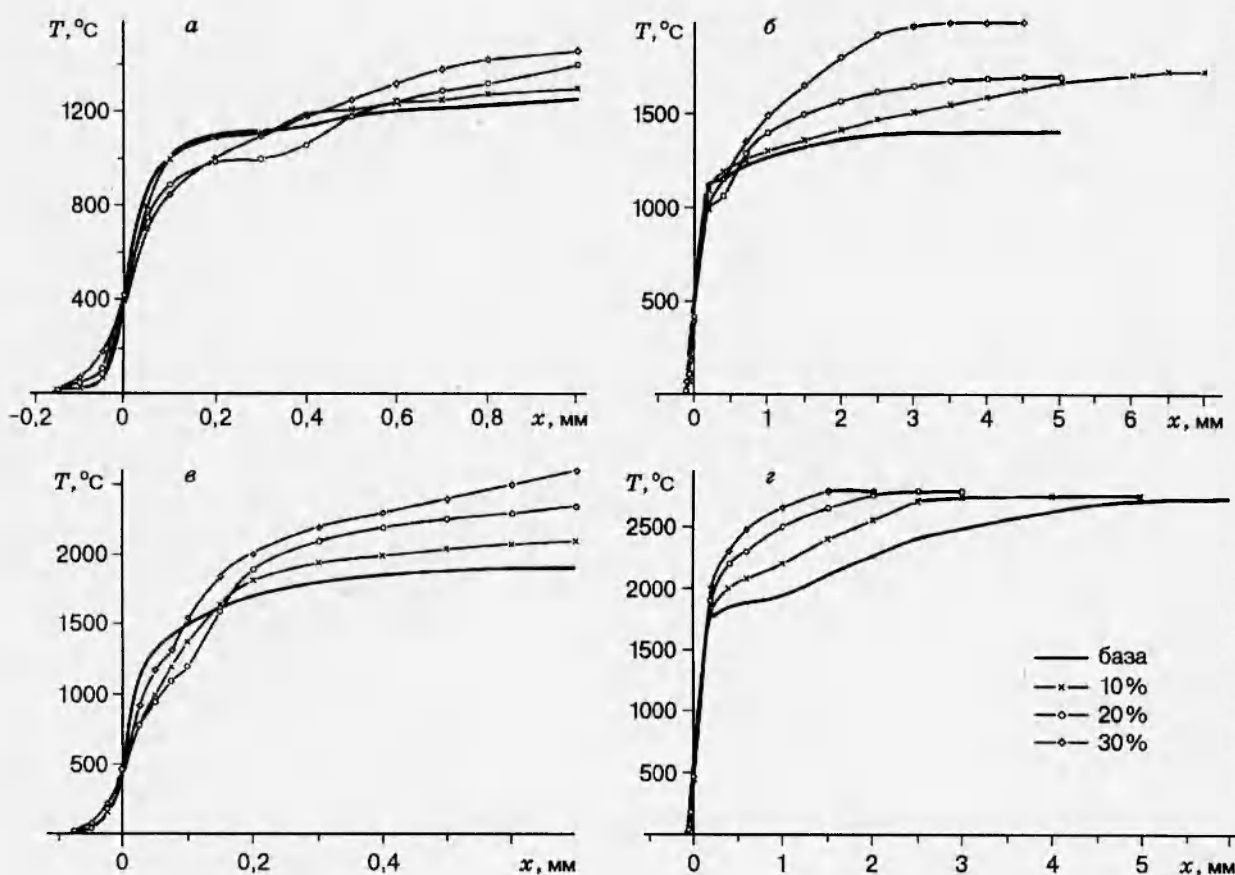


Рис. 1. Осредненные распределения температуры в волнах горения баллиститных порохов при  $p = 20$  (а, б) и 50 атм (в, з):

«база» — состав без октогена; цифры указывают добавки октогена к базовому составу

частиц октогена. Первый порошок содержал частицы октогена размером 30–40 мкм (удельная поверхность  $S_1 = 800 \div 1200 \text{ см}^2/\text{г}$ ), второй — 8–14 мкм ( $S_2 = 2300 \div 4000 \text{ см}^2/\text{г}$ ). Состав порохов одинаковый: 50 % нитроцеллюлозы, 10 % добавки октогена (сверх 100 % по массе) и 40 % других компонентов, включая другие нитроамины и технологические добавки ( $Q_V = 960 \text{ кал/г}$  и  $T_f = 3050 \text{ °C}$ ). Профили температуры были получены при 20 и 100 атм и различных начальных температурах образцов  $T_0$ :  $-80$ ,  $+20$  и  $+100 \text{ °C}$ . В табл. 3 приведены значения разностей параметров волны горения первого и второго порохов.

Измельчение октогена увеличивает, как правило, тепловыделение в к-фазе, что приводит к росту скорости горения. Исключение при  $p = 100 \text{ атм}$  и  $T_0 = 20 \text{ °C}$ , скорее всего, носит случайный характер. Приведенные изменения параметров при  $T_0 = -80$  и  $20 \text{ °C}$  малы, а при повышенных начальных температурах они значительны.

Полученные данные указывают на наличие слабого экзотермического взаимодействия частиц октогена с компонентами баллиститного пороха в реакционном слое к-фазы. Этот результат указывает на сложный характер действия добавки октогена, которая в целом подавляет реакции в к-фазе, т. е. «работает» как балласт. Однако имеется слабое экзотермическое взаимодействие между частицами октогена (уже расплавленными) и его окружением.

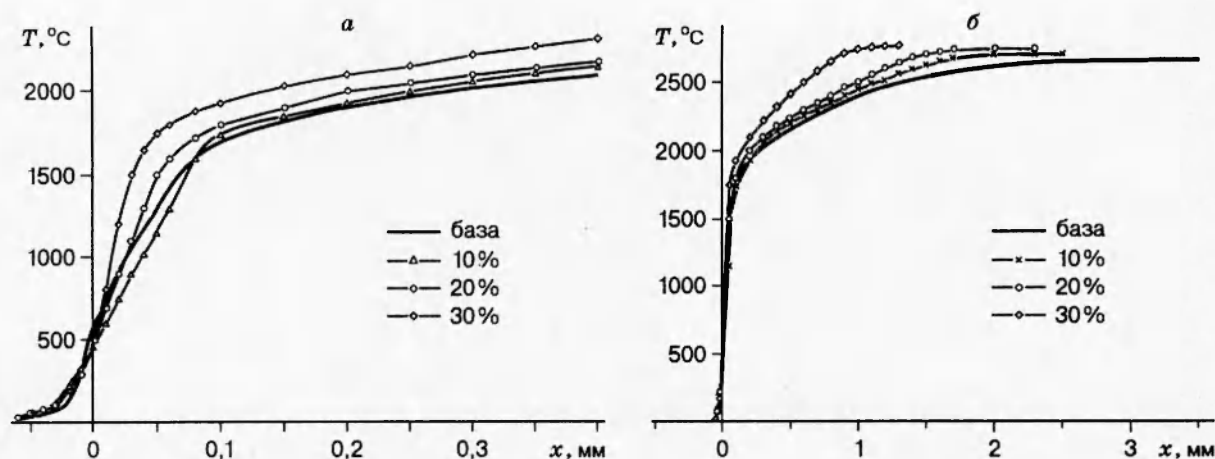


Рис. 2. Осредненные распределения температуры в волнах горения баллиститных порохов при  $p = 100$  атм

Таблица 3

$p$ , атм	$\Delta t$ , г/(см <sup>2</sup> ·с)	$\Delta T_s$ , К	$\Delta q$ , ккал/г	$\Delta Q$ , ккал/г	$\Delta \Phi_0$ , ккал/(см <sup>3</sup> ·с)
$T_0 = -80$ °С					
20	0,03	10	0	20	0
100	0	3	3	0	1
$T_0 = 20$ °С					
20	0,03	5	-2,5	3	-1
100	-0,04	0	2,8	-3	5
$T_0 = 100$ °С					
20	0,24	25	-2	11	0
100	0,40	20	-2	10	2

### О ВЛИЯНИИ ДОБАВОК ЛЕГКОПЛАВКОГО НИТРОАМИНА

В экспериментах были исследованы две рецептуры: первая — 48 % нитроклетчатки, 35 % нитроглицерина и 17 % октогена и технологических добавок ( $Q_V = 1170$  ккал/г), вторая — тот же состав с добавлением 9 % 2,4-динитро, 2,4-дизаапентана (сверх 100 % по массе), имеющий температуру плавления 52 °С (калорийность этого пороха  $Q_u = 1145$  ккал/г). Параметры волн горения исходного пороха ( $T_0 = 20$  °С) и соответствующие разности параметров после введения добавки приведены в табл. 4. Видно, что влияние легкоплавкой добавки очень слабое. Скорее всего, полученные изменения — результат небольшого уменьшения общей энергетики системы (на 25 ккал/г), возникшего из-за низкокалорийной добавки, вытеснившей часть «горячих» компонентов. Отсутствие влияния дополнительного ожигения теплового слоя, по-видимому, связано с тем, что значительное ожигение уже дает присутствие в базовой системе большого количества октогена и на этом фоне слабая добавка легкоплавящейся компоненты незаметна.

Таблица 4

$p$ , атм	$m/\Delta m$ , г/(см <sup>2</sup> ·с)	$T_s/\Delta T_s$ , К	$q/\Delta q$ , кал/г	$Q/\Delta Q$ , кал/г	$\Phi_0/\Delta \Phi_0$ , ккал/(см <sup>3</sup> ·с)	$L/\Delta L$ , мм
20	0,81/−0,02	376/−2	23,5/1,4	101/−2	29/0,6	1,4/−0,01
50	1,42/−0,23	427/−17	24,6/−2,8	117,8/−4,1	85/−27,5	0,67/−0,28
100	2,08/−0,02	465/−1	19,8/−2,6	136,3/−4,4	137/−16	0,18/−0,06

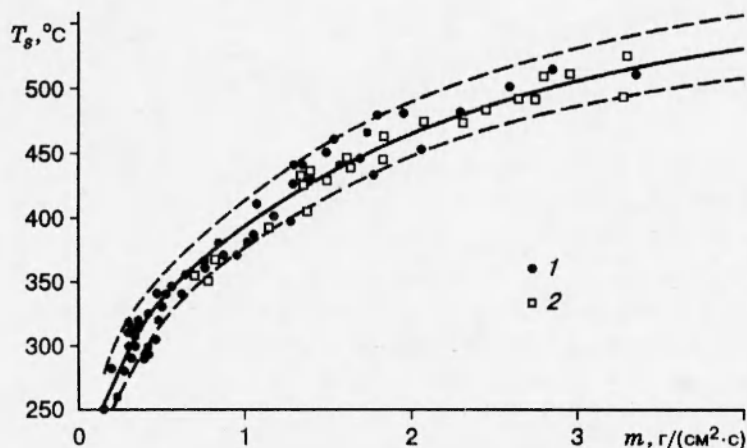


Рис. 3. Объединенная зависимость  $T_s(m)$  для простых и октогенсодержащих баллиститных порохов (закон газификации):

1 — простые пороха с разным  $Q_V$  (сплошная линия — осреднение для этих точек, штриховые — доверительные интервалы); 2 — октогенсодержащие пороха  $g = 10-30\%$ )

### ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ОКТОГЕНА НА ОБЪЕДИНЕННЫЕ ЗАКОНЫ ДЛЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛН ГОРЕНИЯ БАЛЛИСТИТНЫХ ПОРОХОВ

В работах [14, 17–19] были установлены шесть объединенных эмпирических законов для параметров волн горения для простых баллиститных порохов (в основном состоящих из нитроклетчатки и нитроглицерина): газификации, тепловыделения в к-фазе, теплоподвода из газа в к-фазу, темной зоны, для скорости тепловыделения в газе, температурного профиля (при  $p \geq 100$  атм). Проанализируем справедливость трех первых объединенных законов для составов с октогеном.

**Закон газификации.** Закономерности для простых баллиститных порохов иллюстрирует рис. 3. Точки 1 получены в предыдущих исследованиях (см. [14]). Нетрудно видеть, что точки 2 для порохов с октогеном, полученные в данной работе, неплохо ложатся в доверительный интервал.

Закон газификации имеет вид [14, 17]

$$m = 1,8 \cdot 10^3 \exp(-5000/T). \quad (2)$$

Соотношение (2) указывает на существование общей макрокинетики лимитирующей стадии в реакционном слое конденсированной фазы. Действительно, решение уравнения теплопроводности (для первого порядка реакции в к-фазе по реагентам) имеет вид



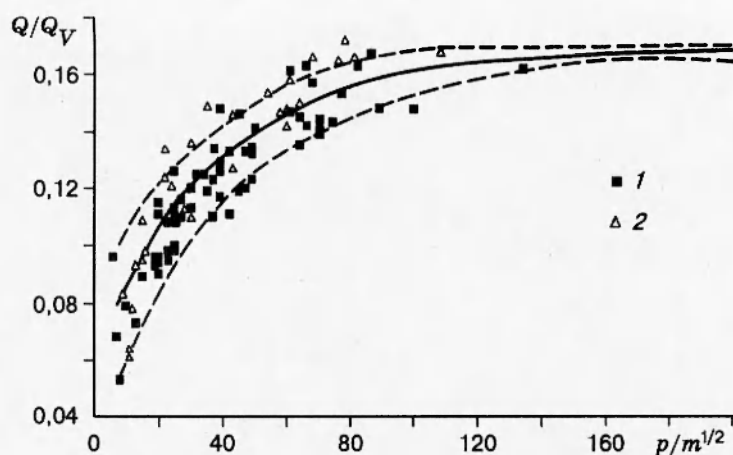


Рис. 4. Объединенная зависимость  $Q/Q_V$  от  $p/\sqrt{m}$  для простых и октогенсодержащих баллиститных порохов (закон теплоподвода из газа в к-фазу):

1 — простые пороха с разным  $Q_V$  (сплошная линия — средние для этих точек, штриховые — доверительные интервалы);  
2 — октогенсодержащие пороха  $g = 10-20\%$

(см. [14, 17]):

$$m^2 = (\lambda\rho/Q^2)(RT_s^2/E)Q^*K_{01}\exp(-E/RT_s), \quad (3)$$

где  $Q^* = 0,17Q_V$ ;  $E$  — эффективная энергия активации стадии, лимитирующей разложение пороха в волне горения;  $K_{01}$  — предэкспонент. Экспериментальные данные для простых баллиститных порохов, представленные в координатах  $\ln(mQ/T_s)$ ,  $T_s^{-1}$ , дают единую прямую, из которой получается значение  $E = (21 \pm 1)$  ккал/моль и  $K_{01} = (8_{-2}^{+6}) \cdot 10^{-9}$ , 1/с (см. [14, 17]). Нетрудно видеть, что уравнение (2) представляет собой упрощенную форму уравнения (3) и отражает тот факт, что наиболее существенной в (3) является экспоненциальная зависимость. В безразмерной форме соотношение (2) можно представить в виде

$$m^* = \exp(-\Theta_s),$$

где  $m^* = m/m_{\max}$ ,  $m_{\max} = 1,8 \cdot 10^3$  г/(см<sup>2</sup> · с) — максимальная скорость горения баллиститного пороха;  $\Theta_s = E/RT_s$ .

**Закон тепловыделения в к-фазе.** Второй объединенный закон для баллиститных порохов связывает относительное тепловыделение в к-фазе  $Q/Q_V$  и параметр  $p/m^{1/2}$ . Рис. 4 иллюстрирует эту связь, полученную для простых баллиститных порохов. Второй обобщенный закон можно представить зависимостью (см. [14, 18]):

$$Q/Q_V = 0,17 - 0,103 \exp(-0,0253p/m^{1/2}). \quad (4)$$

Точки для баллиститных порохов с октогеном несколько расширяют область рассеяния, не смещая существенно положение сплошной линии. Из уравнения (3) следует, что при очень высоких давлениях  $Q = 0,17Q_V = Q^*$ .

**Закон теплоподвода из газа в к-фазу.** Третий обобщенный закон для баллиститных порохов — следствие первых двух, поскольку из первого интеграла уравнения тепло-

проводности следует

$$q = c(T_s - T_0) - Q. \quad (5)$$

Это соотношение прямо следует из уравнения (1), если пренебречь членами  $q_r$  и  $q_m$ , которые в рассматриваемом случае достаточно малы. Уравнение (5) является обобщенным (или объединенным), поскольку в его правой части содержатся обобщенные функции  $T_s(m)$  и  $Q$ .

Таким образом, уравнения (2), (4), (5) позволяют рассчитывать тепловой баланс к-фазы горящих сложных баллиститных порохов по параметрам  $m$ ,  $Q_V$  и  $p$ . Справедливость указанных законов для октогенсодержащих порохов указывает на то, что горение этих порохов контролируется баллиститными компонентами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные с помощью микротермопарной методики профили температуры стабильных волн горения баллиститных порохов с добавками октогена при давлениях 20, 50 и 100 атм позволили найти основные параметры волн горения этих порохов. Было установлено, что добавки октогена уменьшают скорость горения, температуру поверхности горения, тепловыделение в к-фазе и скорость тепловыделения в газе вблизи поверхности. Добавки октогена увеличивают интенсивность химических реакций в газовой фазе волны горения, что ведет к сокращению протяженности газофазной реакционной зоны и увеличивает температуру газа (особенно при низких давлениях). Установлено небольшое экзотермическое взаимодействие в реакционном слое к-фазы между октогеном и нитроцеллюлозой.

Установлено, что три первых объединенных закона для параметров зон горения баллиститных порохов (газификации, тепловыделения в к-фазе и теплоподвода из газа в к-фазу), найденные ранее для простых баллиститных порохов, справедливы и для октогенсодержащих порохов. Справедливость объединенных законов для октогенсодержащих баллиститных составов показывает, что горение этих порохов контролируется баллиститными компонентами.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-02-14554), Международного научного фонда (ISF) (грант MSP000) и совместного фонда Российского правительства и ISF (грант MSP300).

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Boggs T. L.** The thermal behaviour of cyclotrimethylenetrinitramine (RDX) and cyclo-tetramethylenetetranitramine (HMX) // *Fundamentals of Solid-Propellant Combustion* / K. K. Kuo, M. Summerfield (eds). New York: Acad. Press, 1984. P. 121-175. (Progress in Astronautics and Aeronautics; 90).
2. **Fifer R. A.** Chemistry of nitrate esters and nitramine propellants // *Ibid.* P. 177-237.
3. **Cohen N. S., Price C. F.** Combustion of nitramine composite propellants // *AIAA Paper*. 1981. N 81-1582.
4. **Kubota N.** Combustion mechanisms of nitramine composite propellants // 18th Symp. (Int.) on Combustion. Pittsburgh: Combustion Institute, 1981. P. 187-193.
5. **Maruizumi M., Fukuma D., Shiota K., Kubota N.** Thermal decomposition of RDX composite propellants // *Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. 1982. V. 7. P. 40-43.

6. **Beckstead M. W.** A model for solid propellant combustion // 19th Symp. (Int.) on Combustion. Pittsburgh: Combustion Institute, 1982. P. 175–185.
7. **Cohen-Nir E.** Combustion characteristics of advanced nitramine-based propellants // Ibid. P. 195–206.
8. **Fong C. W., Smith R. F.** The effect of binder, particle size and catalysts on the burning rates of PETN and RDX composite propellants // Combust. Sci. Techn. 1988. V. 57, N 1. P. 1–15.
9. **Kubota N.** Physicochemical processes of HMX propellant combustion // 19th Symp. (Int.) on Combustion. Pittsburgh: Combustion Institute, 1982. P. 777–785.
10. **Yano Y., Kubota N.** Combustion of HMX-CMDB propellants // Propellants, Explosives and Pyrotechnics. 1985. V. 10, N 6. P. 192–196.
11. **Beckstead M. W., McCarty K. P.** Modeling calculations for HMX propellants // AIAA J. 1980. V. 20. P. 106–110.
12. **Raman K. V., Singh H.** Ballistic modification of RDX-based CMDDB propellants // Propellants, Explosives and Pyrotechnics. 1988. V. 13. P. 149–151.
13. **Финяков С. В.** Исследование механизма горения порохов при обдуве горячей поверхности: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1992.
14. **Zenin A. A.** Thermophysics of stable combustion waves of solid propellants // Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants / L. De Luca, E. W. Price, M. Summerfield (eds). New York: Acad. Press, Ch. 6. P. 197–231. (Progress in Astronautics and Aeronautics; 173).
15. **Зенин А. А.** О теплообмене термодисперсных веществ в условиях горения конденсированных веществ // ПМТФ. 1963. № 5. С. 125–131.
16. **Лейпунский О. И., Зенин А. А., Пучков В. М.** Влияние катализатора на характеристики зоны горения конденсированного вещества // Горение и взрыв. Материалы III Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. М., 1972. С. 74–77.
17. **Зенин А. А.** Об одной модели реакционного слоя конденсированной фазы баллиститного пороха // Докл. АН СССР. 1973. Т. 213, № 6. С. 1357–1359.
18. **Зенин А. А.** Универсальная зависимость для тепловыделения в к-фазе и макрокинетика газа при горении баллиститных порохов // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 4. С. 78–80.
19. **Zenin A. A., Finjakov S. V.** Unified dependencies for dark zone of combustion waves of complex nitrate ethers // 25th Symp. (Int.) on Combustion: Proc. of Work-in-Progress Posters. Combustion Institute, 1994. P. 437.
20. **Лейпунский О. И., Новожилов Б. В., Зенин А. А. и др.** Определение функции скорости тепловыделения по заданному температурному профилю // Отчет ИХФ АН СССР. М., 1984.

*Поступила в редакцию 2/XI 1995 г.*

---