

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН ГОРЕНИЯ ГЕКСОГЕНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ И НАЧАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А. А. Зенин, С. В. Финяков

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, zenin31@list.ru

Измерены скорости горения гексогена и профили температуры в волне при широкой вариации давления и начальной температуры. Найдены параметры волн горения. Показано, что газовая фаза гексогена имеет однозонную структуру. Существует два режима горения гексогена: основной, при $p > 0.1$ МПа, и особый, при $p \leq 0.1$ МПа. Получены основные характеристики этих режимов и области волны, главным образом определяющие скорость горения. Оба режима характеризуются широкими зонами реакции в газовой фазе. На горячей поверхности процессы испарения и разложения конденсированной фазы протекают одновременно. Оценена доля термического разложения в реакционном слое этой фазы. Найдены законы газификации (пиролиза) гексогена в волне горения, которые оказались такими же, как и для октогена. Получены распределения скорости тепловыделения в волне горения — в реакционном слое конденсированной фазы и в газовой фазе. Измерена чувствительность скорости горения к начальной температуре.

Ключевые слова: скорость горения, профили температуры, скорость тепловыделения, параметры зон, макрокинетика, чувствительность.

ВВЕДЕНИЕ

Гексоген используется как взрывчатое вещество, как добавка к различным порохам и как основа для современных смесевых ракетных топлив. Горение гексогена и смесевых композиций на его основе тщательно изучалось последние годы [1–7]. Исследовалась и термическая структура волн горения [2–5]. Тем не менее данные по горению гексогена недостаточно подробные. До настоящего времени нет публикаций о трансформации термической структуры волн горения гексогена при изменении начальной температуры. Нет данных по параметрам зон горения при таком изменении. Нет данных и по температурной чувствительности скорости горения.

Задача настоящей работы — восполнить указанные пробелы. Ранее частично публиковались данные по профилям температуры и параметрам зон горения гексогена для образцов комнатной температуры [2–4], а также по макрокинетике газификации для этой начальной температуры [4]. В настоящей работе некоторые из этих данных уточнены. В статье предложен метод оценки средней скорости тепловыделения в реакционном слое конденсированной фазы и проведено сопоставление скоростей

тепловыделения в конденсированной и газовой фазах.

1. ОБЪЕКТ ИЗУЧЕНИЯ

Циклический нитрамин ($C_3H_6N_6O_6$), называемый гексогеном (RDX — в англоязычной литературе), — это циклотриметилен-тринитрамин. Его молекулярная масса 222.1 г/моль, плотность монокристалла 1.8 г/см³, температура плавления 200 °С, адиабатическая температура пламени 2860 °С, теплота образования 320 Дж/г, кислородный баланс –21.6 %, теплота плавления 29 кал/г. В экспериментах использовался порошок гексогена высокой чистоты (> 99 %) с частицами различного фракционного состава. Чаще всего использовались порошки с частицами размером < 50 мкм, а для работы при высоких давлениях (20 ÷ 30 МПа) — менее 10 мкм. Обычно прессовались образцы стандартных размеров 15 × 15 × 10 мм, плотностью 1.68 ÷ 1.7 г/см³, а для высоких давлений — плотностью до 1.77 г/см³ (при давлении прессования 5 000 кг/см²).

2. МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Структура волн горения гексогена изучалась с использованием микротермопарной методики, изложенной и обоснованной в [8–10]

Работа выполнена при частичной поддержке фонда ISF (грант MSP 300) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 97-03-32076).

Таблица 1

Параметры зон горения гексогена

Параметры	p , МПа				
	0.5	1	2	5	10
	T_0 , °C				
	20/100	-100/20/100	-100/20/100	-100/20/100	-100/20/100
m , г/(см ² ·с)	0.28/0.35	0.4/0.48/0.6	0.7/0.84/1.0	1.54/1.76/2.0	2.48/2.88/3.2
T_s , °C	390/400	410/420/440	450/465/480	510/515/520	530/540/550
φ_0 , 10 ⁴ К/см	15/12	22/20/15	24/22/18	28/25/22	31/28/25
q , кал/г	75/52	84/65/40	56/43/30	31/24/19	22/17/14
q_r , кал/г	11/9	13/11/9	12/11/9	11/9/7	8/7/6
Q , кал/г	94/95	145/120/120	190/160/145	230/200/170	250/210/180
l , мкм	80/100	55/60/70	35/40/55	25/30/40	18/20/30
l_m , мкм	70/95	35/50/80	30/35/60	20/30/50	16/20/35
l_r , мкм	8.5/16	5/7/10	3.8/5.4/9.0	1.7/1.8/4.0	1.3/1.7/3.0
χ , 10 ⁻³ см ² /с	1.4/2.4	1.3/1.7/2.5	1.5/2.0/3.3	2.3/3.2/4.8	2.7/3.5/5.8
λ_s , 10 ⁻⁴ кал/(см·К·с)	9/16	9/12/17	10/13/22	15/21/32	18/23/38
T_f , °C	2 500/2 550	2 500/2 600/2 700	2 600/2 700/2 800	2 700/2 820/2 800	2 750/2 860/2 950
L , мм	1.25/1.3	1.0/1.3/1.4	0.9/1.2/1.25	0.8/1.0/1.0	0.6/0.8/0.75
ϑ , мкм	15/13	11/9.7/8.0	6.8/5.7/5.0	3.2/2.8/2.5	2.0/1.8/1.6
Ω	80/100	90/150/175	130/210/250	250/360/400	300/440/470
ζ	0.58/0.6	0.64/0.65/0.7	0.75/0.75/0.8	0.88/0.87/0.88	0.93/0.93/0.93
F_k , ккал/(см ³ ·с)	33/22	120/90/70	350/260/170	2 180/1 800/10	5 060/3 800/2 170
F_0^* , ккал/(см ³ ·с)	14/14	30/32/30	55/60/60	150/150/150	260/280/280
F_0 , ккал/(см ³ ·с) ($T_0 = 20$ °C)	14.5	35	70	170	330

применительно к волнам горения различных порохов и октогена. Вольфрам-рениевые ленточные термопары толщиной $2 \div 7$ мкм заделывались в образцы в процессе прессования. Эта методика применима и к изучению горения гексогена. В частности, в опытах с гексогеном также наблюдаются малые смещения температурного профиля из-за тепловой инерционности термопар в начале газовой фазы. Даже при высоких давлениях они составляют $10 \div 15$ мкм при общей ширине области переменной температуры $150 \div 130$ мкм (см. ниже). Это смещение легко учитывается, и восстанавливается реальное температурное распределение [11]. Как и у октогена, теплопровод-

ность теплового слоя к-фазы гексогена заметно увеличивается с ростом давления и средней температуры этого слоя (см. ниже), что допускает надежные измерения профиля температуры в к-фазе при высоких давлениях [8]. Горение гексогена также имеет одномерный и стационарный характер, что позволяет пользоваться простыми формулами для определения теплоподвода теплопроводностью из газа в к-фазу и для оценки тепловыделения в реакционном слое к-фазы [8]. Лишь при субатмосферных условиях большие газовые пузыри на поверхности усложняют картину, что требует значительного статистического материала для осреднения профилей. Обычно для каждого режима горе-

Таблица 2
 Параметры зон горения гексогена при субатмосферных, атмосферном и высоких давлениях ($T_0 = 20^\circ\text{C}$)

Параметры	p , МПа				
	0.05	0.075	0.1	20	30
m , г/(см ² ·с)	0.03	0.05	0.08	4.1	4.9
T_s , °C	270	300	320	560	570
φ_0 , 10 ⁴ К/см	6	7	10	36	41
q , кал/г	240	168	150	14	13
q_r , кал/г	5	4.8	6	5	4
Q , кал/г	-115	-35	-14	225	232
l , мкм	400	270	190	19	17
l_m , мкм	200	170	130	20	18
l_r , мкм	20	16	13	1.7	1.5
χ , 10 ⁻³ см ² /с	0.8	0.8	0.9	4.7	5
$10^{-4} \lambda_s$, кал/(см·К·с)	5	5	6	31	33
T_f , °C	1600	1800	2100	2870	2875
L , мм	1.0	1.5	1.0	0.15	0.13
ϑ , мкм	200	130	80	2.0	1.7
$\Omega = L/\vartheta$	5	12	125	75	76
ζ	0	0.05	0.18	0.97	0.99
F_k , ккал/(см ³ ·с)	-1.6	-0.77	0.25	5 820	8 080
F_0^* , ккал/(см ³ ·с)	—	—	—	450	600
F_0 , ккал/(см ³ ·с)	3	—	0.4	560	850

ния измерялись 10 ÷ 12 профилей температуры, на основе которых получался осредненный профиль $T(x)$. При субатмосферных давлениях опыты проводились в вакуумной установке, в среде азота, а при повышенных давлениях — в бомбе постоянного давления объемом 2 л, с окнами. Внутри бомбы находился небольшой термостат, внутрь которого помещались образцы. Подогрев образца осуществлялся нихромовой спиралью, нагреваемой электрическим током. Отрицательные температуры образца достигались охлаждением жидким азотом, наливаемым в термостат. При давлениях $p = 20 \div 30$ МПа образцы гексогена с запрессованными термопарами сжигались в сателлите, состыкованном с ракетной камерой, в которой на время сгорания образца создава-

лось указанное давление. Температуры образца и распределения температур в волне горения регистрировались термопарами, сигнал которых выводился через клеммы в крышке бомбы, дно сателлита или платформу вакуумной установки. Массовая скорость горения определялась различными методами — оптическим, с помощью фоторегистратора, по времени между сигналами от термопар, заделанных в образцы на известном расстоянии, и по чувствительному датчику давления, регистрирующему начало и конец горения образца известной длины. Температуры горячей поверхности T_s определялись методом «визуализации» и по излому записи температур в месте выхода термоспая на поверхность [8–10]. Аппаратурная ошибка измерения скорости горения и температуры порядка 1 %.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБРАБОТКА

Массовые скорости горения m , профили температуры $T(x)$ и температуры горячей поверхности T_s , полученные в экспериментах, приведены в табл. 1, 2 и на рис. 1–4. В таблицах даны среднеквадратичные значения результатов измерений и расчетов. В табл. 1, 2, помимо указанных, приведены следующие параметры: $\varphi_0 = (dT/dx)_0$ — градиент температуры у поверхности со стороны газа; Q — тепловыделение в реакционном слое к-фазы; q — теплоподвод из газа в к-фазу теплопроводностью; q_r — теплоподвод из газа в к-фазу излучением; λ_s — теплопроводность к-фазы; l , l_m и l_r — толщины теплового, расплавленного и реакционного слоев в к-фазе; T_f — температура пламени; χ — температуропроводность к-фазы; L — толщина газовой фазы волны горения (от T_s до $0.99T_f$); $\vartheta = \lambda/c_p m$ — кондуктивный размер газовой фазы, где λ — теплопроводность газовой фазы, c_p — удельная теплоемкость газа; $\Omega = L/\vartheta$ — относительная толщина газовой фазы; ζ — доля экзотермического разложения гексогена при газификации к-фазы; F_k — средняя скорость объемного тепловыделения в реакционном слое к-фазы; $F_0^* = m c_p \varphi_0$ — приближенная оценка скорости объемного тепловыделения в газе у поверхности горения; F_0 — истинное значение этой скорости у поверхности. Стандартные отклонения составляют: $\Delta m = \pm 5\%$, $\Delta T_s = \pm 5\%$, $\Delta \varphi_0 = \pm 10\%$, $\Delta q = \pm 12\%$, $\Delta Q = \pm 8\%$, $\Delta l = \pm 15\%$, $\Delta L = \pm (10 \div 20)\%$,

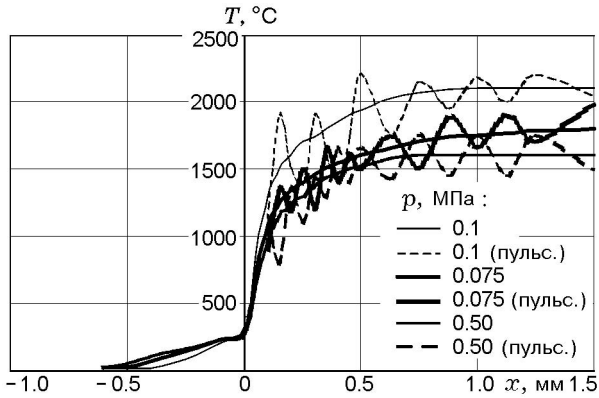


Рис. 1. Осредненные и реальные профили температуры при горении гексогена при низких давлениях ($T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$)

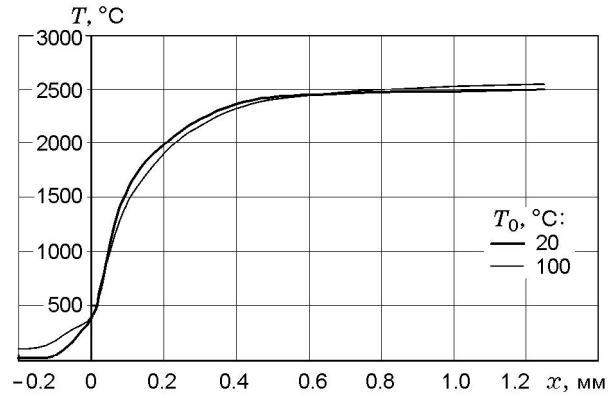


Рис. 2. Осредненные профили температуры при горении гексогена при $p = 0.5\text{ МПа}$ и различных начальных температурах

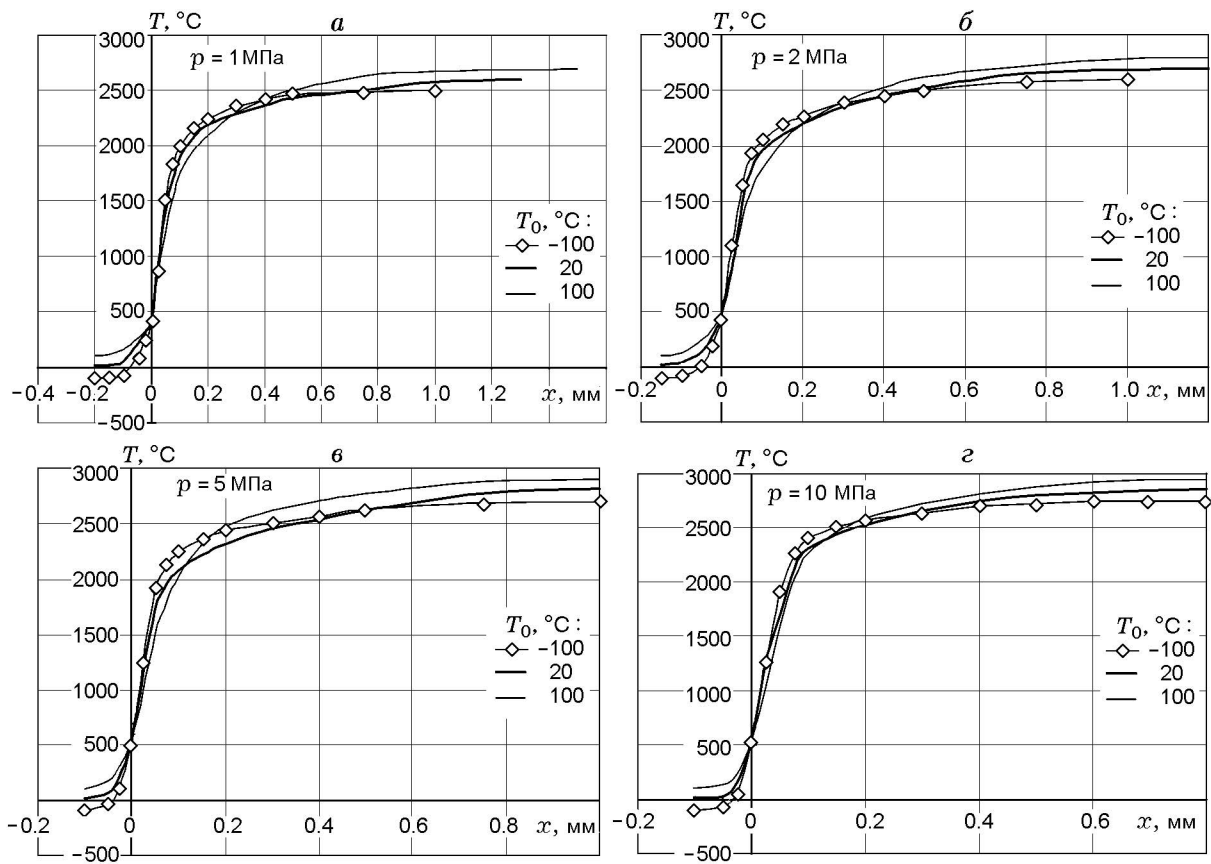


Рис. 3. Осредненные профили температуры при горении гексогена при различных давлениях и начальных температурах

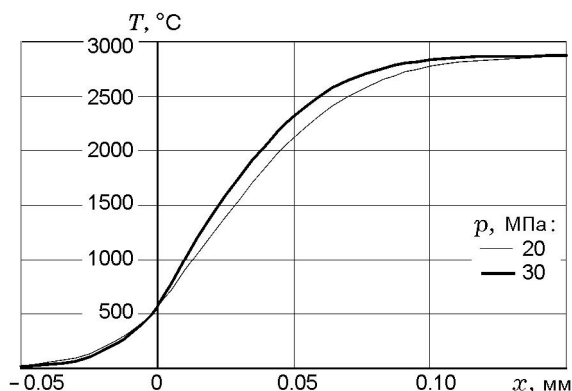


Рис. 4. Осредненные профили температуры при горении гексогена при высоких давлениях ($T_0 = 20^\circ\text{C}$)

$\Delta F = \pm(10 \div 20)\%$. В табл. 3 приведены значения коэффициентов λ и c_p как функции температуры газа. Параметры зон горения при давлениях $0.5 \div 10$ МПа и начальных температурах $T_0 = -100, 20$ и 100°C показаны в табл. 1. Параметры зон при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ и субатмосферных и атмосферном давлениях, а также при высоких давлениях представлены в табл. 2. Рис. 1 демонстрирует реальные и осредненные профили температуры при субатмосферных и атмосферном давлениях. Рис. 2, 3 показывают, как изменяются осредненные профили $T(x)$ при варьировании давления в диапазоне $0.5 \div 10$ МПа при $T_0 = -100, 20$ и 100°C . На рис. 4 представлены профили $T(x)$ при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ и $p = 20$ и 30 МПа.

3.1. Распределения температуры в волнах горения

На рис. 1 видно, что при $p = 0.05 \div 0.1$ МПа, когда скорости горения исключительно низкие, профили температуры гексогена (как и октогена) четко разделяются на к-фазную и газофазную части. В к-фазе это затяжные, пологие и гладкие кривые, а в газовой фазе наблюдается резкий подъем температуры, сопровождаемый значительными температурными пульсациями из-за газовых пузырей, хаотически возникающих на горячей поверхности (см. [1]). На рис. 1 приведены также осредненные профили. Распределение температуры в к-фазе характеризуется наличием плато в расплавленном слое, который у гексогена особенно заметен из-за низкой температуры плавления. С ростом давления размеры газовых пузырей на горячей поверхности гексогена

быстро уменьшаются, и при $p = 0.5$ МПа распределения температуры $T(x)$ становятся уже слабо пульсирующими и отчетливое разграничение конденсированной и газовой фаз практически исчезает. Рис. 2 демонстрирует полученные при $p = 0.5$ МПа осредненные профили для $T_0 = 20$ и 100°C (при $T_0 = -100^\circ\text{C}$ гексоген здесь не горит), а рис. 3 — трансформацию профиля $T(x)$ с изменением T_0 от -100 до 100°C при давлениях $1 \div 10$ МПа. Видно, что профили температуры гексогена (как и октогена [4, 8]) имеют однозонную структуру газовой фазы.

При $p > 0.1$ МПа не удается, из-за возросшей скорости горения и быстрого уменьшения размеров зон, отметить на профилях температуры в к-фазе момент плавления, хотя это плавление несомненно имеет место, о чем свидетельствуют кинокадры горения как гексогена, так и порохов с его добавками. На шашках из специально измельченного, плотно спрессованного гексогена удалось получить профили температуры при давлениях 20 и 30 МПа.

3.2. Параметры зон горения φ_0, q, Q, T_f и L

Удельные (на единицу массы сгоревшего гексогена) тепловые потоки из газа в к-фазу теплопроводностью q определялись по наклону профилей температуры вблизи горячей поверхности $\varphi_0 = (dT/dx)_0$. Поток тепла в к-фазу излучением от пламени (q_r) рассчитывался по составу продуктов сгорания. Тепловой эффект в реакционном слое к-фазы рассчитывался по формуле

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

где

$$q = \lambda(T)\varphi_0/m, \quad (2)$$

c — удельная теплоемкость теплового слоя к-фазы, равная 0.4 кал/(г·К), q_m — теплота плавления, кал/г. При $p \leq 1$ МПа градиенты температуры сравнительно невелики: $\varphi_0 = (6 \div 10) \cdot 10^4$ К/см, однако при наблюдающихся значениях скорости горения $m = 0.03 \div 0.08$ г/(см²·с) эти градиенты обуславливают большой поток тепла теплопроводностью из газа в к-фазу. Расчеты по уравнению (1) показывают наличие отрицательного теплового эффекта в реакционном слое к-фазы. Из табл. 2 видно, что при $p = 0.05$ МПа теплоподвод равен $q = 240$ кал/г, а тепловой эффект

Таблица 3
Теплофизические коэффициенты продуктов сгорания гексогена

Параметры	$T, \text{ }^\circ\text{C}$							
	300	400	500	600	1000	1500	2000	2500
c_p , кал/(г·К)	0.325	0.330	0.336	0.342	0.368	0.400	0.426	0.456
λ , 10^{-4} кал/(см·К·с)	1.19	1.35	1.52	1.70	2.40	3.26	4.10	5.15

в к-фазе $Q = -115$ кал/г. С увеличением давления градиенты φ_0 растут от $15 \cdot 10^4$ К/см при 0.5 МПа до $25 \cdot 10^4$ К/см при 10 МПа и до $41 \cdot 10^4$ К/см при 30 МПа ($T_0 = 20$ °С). Это означает (см. табл. 1 и 2), что при $p > 0.1$ МПа тепловой эффект становится положительным и быстро растет с ростом давления и скорости горения, а теплоподвод уменьшается. Действительно, при $p > 0.1$ МПа тепловой эффект растет от $Q = 91$ кал/г при 0.5 МПа до 214 кал/г при 10 МПа и до 236 кал/г при 30 МПа ($T_0 = 20$ °С). Теплоподвод с ростом давления от 0.1 до 10 МПа уменьшается со 150 до 17 кал/г, а при $p = 30$ МПа он составляет $q = 13$ кал/г ($T_0 = 20$ °С). Увеличение начальной температуры, как правило, снижает значения φ_0 , q и Q . Теплоподвод в к-фазу из газа за счет теплового излучения q_r мал (значительно меньше величин q и Q). При горении гексогена (как и октогена [4, 8]) наблюдается высокая полнота реакции: при субатмосферных давлениях температура пламени выше 1500 °С, а при $p = 1$ Тф > 2000 °С. Максимальная полнота реакции достигается при $p \approx 5$ МПа.

Размеры зоны переменной температуры в газовой фазе (отсчитывается от температуры T_s до значения $0.99T_f$), т. е. толщины пламени над поверхностью горения, малы и составляют при субатмосферных и атмосферном давлениях $L = 1.0 \div 1.5$ мм. При $p = 0.5 \div 10$ МПа $L = 0.5 \div 1.5$ мм, а при высоких давлениях значение L снижается до $150 \div 130$ мкм. С ростом начальной температуры образцов величина L несколько возрастает.

3.3. Размеры зон l и l_m к-фазы

Характерные размеры зон к-фазы l и l_m определялись по осредненным распределениям $T(x)$ в к-фазе. Толщины теплового слоя l находились как расстояние между точками с температурами T_s и $(T_s - T_0)/e + T_0$, а толщины расплавленного слоя l_m — от T_s до температуры

плавления T_m . Из-за относительно низкой температуры плавления гексогена тепловой слой к-фазы практически состоит из расплавленного слоя (ср. l и l_m). Эти размеры быстро уменьшаются с ростом скорости горения, что естественно ввиду обратной пропорциональной зависимости толщины теплового слоя от m . Уменьшение начальной температуры, снижающее скорость горения и температуру горячей поверхности (при фиксированном давлении), расширяет тепловой слой к-фазы.

3.4. Температуропроводность и теплопроводность к-фазы

Оценки коэффициента температуропроводности теплового слоя к-фазы проводились по формуле $\chi = lu$ (u — линейная скорость горения), следующей из выражения для михельсоновского распределения температуры. Этим выражением можно пользоваться, во-первых, потому, что тепловой слой практически состоит из расплавленного слоя (см. выше), что означает отсутствие искажения профиля температуры в к-фазе из-за плавления на расстоянии от $x = 0$ до $x = -l$. Во-вторых, увеличение толщины теплового слоя незначительно из-за наличия реакционного слоя к-фазы, что будет продемонстрировано ниже ($l_r/l = 5 \div 15$ %). Табл. 1 и 2 показывают, что при субатмосферных и атмосферном давлениях значения χ близки к типичной для порохов величине 10^{-3} см²/с [9], а с увеличением давления и скорости горения они растут, достигая при $p = 10 \div 30$ МПа значений $\chi = (4 \div 5) \cdot 10^{-3}$ см²/с. Оценки коэффициента теплопроводности теплового слоя к-фазы проводились по формуле $\lambda_s = \chi c_p$. Как видно из табл. 1 и 2, при субатмосферных и атмосферном давлениях значения λ_s близки к соответствующим значениям для порохов [9], равным $(4 \div 6) \cdot 10^{-4}$ кал/(см·К·с). С увеличением давления и скорости горения гексогена коэффициент теплопроводности λ_s

(как и χ) растет, достигая при $p = 10 \div 30$ МПа значений $(18 \div 40) \cdot 10^{-4}$ кал/(см·К·с). Аналогичный рост наблюдался при горении октогена [8], баллиститных порохов [9, 12, 13] и смесевых систем [9, 11, 13–18].

3.5. Скорости тепловыделения в газовой фазе вблизи поверхности

Скорость тепловыделения в газе вблизи поверхности горения можно оценить по приближенной формуле

$$F_0^* = mc_p \varphi_0. \quad (3)$$

Точные расчеты скорости объемного тепловыделения в газовой фазе $F(x)$ (см. ниже) показывают, что формула (3) довольно неплохо предсказывает истинные значения этой величины вблизи поверхности (F_0) при положительном тепловом эффекте в к-фазе (см. табл. 1 и 2). Эта формула получена из уравнения теплопроводности при пренебрежении вкладом первого (кондуктивного) члена. При нулевом или отрицательном значении Q пренебрегать второй производной в уравнении теплопроводности нельзя, требуется точный расчет.

Скорость тепловыделения, очевидно, есть мера интенсивности химических реакций. Табл. 1 и 2 показывают, что эта интенсивность вблизи поверхности горения в газовой фазе гексогена высока и быстро растет с ростом давления. От начальной температуры она практически не зависит. Сравнение с данными для порохов показывает [9, 12], что у гексогена она существенно выше.

3.6. Распределения скорости тепловыделения по газовой фазе. Широкие зоны реакции в газовой фазе

Распределения скорости объемного тепловыделения по газовой фазе $F(x)$ получались численным решением уравнения теплопроводности

$$\frac{d}{dx} \lambda \frac{dT}{dx} - c_p m \frac{dT}{dx} + F(x) = 0 \quad (4)$$

по специальной программе. Результаты расчета представлены на рис. 5. Видно, что в основном режиме горения ($p > 0.1$ МПа) скорость тепловыделения максимальна у поверхности и с ростом x только уменьшается. Подчеркнем,

что областью тепловыделения является вся зона газовой фазы для всех изученных режимов горения, начиная с давления 0.05 МПа. Сопоставление полученных размеров зон газовой фазы L с кондуктивным размером газовой фазы $\vartheta = \lambda/c_p m$ показывает, что отношение $\Omega = L/\vartheta$ всегда существенно больше единицы, даже при $p \leq 0.1$ МПа, а в основном режиме горения ($p > 0.1$ МПа) значения Ω на два порядка превышают единицу (см. табл. 1 и 2). Это означает, что при горении гексогена всегда образуются широкие зоны реакции в газовой фазе. В этом отношении гексоген не отличается от всех изученных ранее моноотоплив (ПХА, октоген, нитрозоамин-Ц-2 — см. [2, 8, 19, 20]), баллиститных [9, 12, 13, 20, 21] и смесевых порохов [9, 11, 13–18], всегда имеющих широкие зоны реакции в газовой фазе, независимо от того, однозонна или многозонна газовая фаза.

3.7. Средняя скорость тепловыделения в реакционном слое к-фазы и его толщина. Узкие зоны реакции в к-фазе

Полученные выше данные позволяют оценить средние скорости тепловыделения в реакционном слое к-фазы. Экспериментально получить распределения температуры в этом слое невозможно ввиду его чрезвычайно малых размеров, поэтому для указанной оценки сделаем упрощающие предположения о таком распределении. Будем полагать, что температура в реакционном слое изменяется таким образом, что градиент температуры φ увеличивается по мере удаления от поверхности в глубь к-фазы с постоянной скоростью. Зная значения тепловых потоков на границах слоя, нетрудно установить, что в этом случае φ определяется выражением

$$\varphi(x) = Qm/l_r \lambda_s + qm/\lambda_s. \quad (5)$$

Действительно, выражение (5) удовлетворяет условиям на внешней и внутренней границах реакционного слоя. Имеем $\varphi(0) = qm/\lambda_s$ на внешней границе и $\varphi(l_r) = Qm/\lambda_s + qm/\lambda_s$ — на внутренней. Осредненное по слою значение градиента равно

$$\varphi = Qm/2\lambda_s + qm/\lambda_s, \quad (6)$$

т. е. полусумме градиентов на внешней и внутренней границах. Изменение температур по толщине реакционного слоя равно $\theta = RT_s^2/E$, где R — универсальная газовая постоянная,

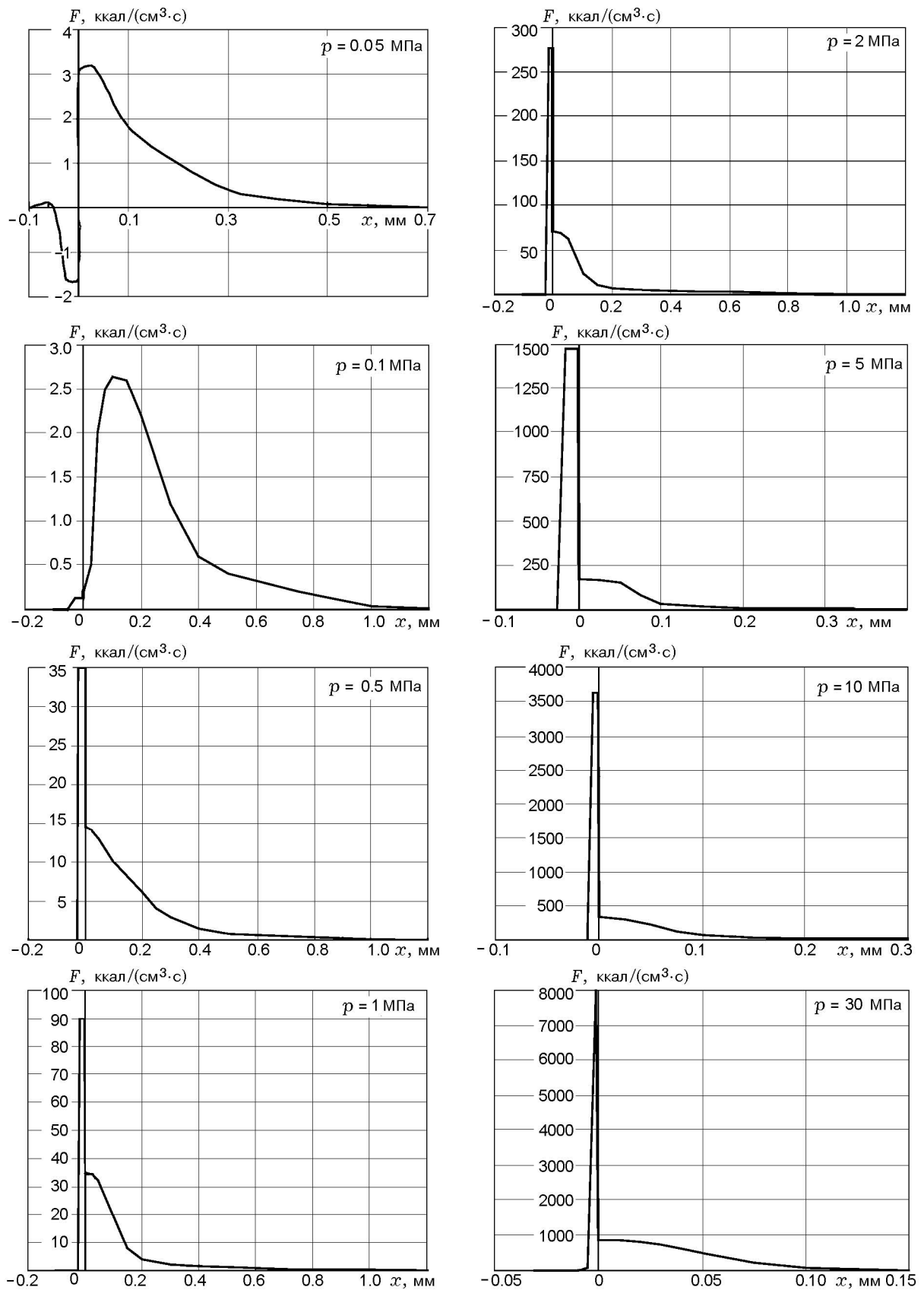


Рис. 5. Распределения скорости тепловыделения в волне горения гексогена ($T_0 = 20$ °C)

E — энергия активации. Поэтому толщина определяется формулой

$$l_r = \frac{RT_s^2}{E} \left(\frac{Qm}{2\lambda_s} + \frac{qm}{\lambda_s} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Подставляя (5) в уравнение теплопроводности для к-фазы и осредняя полученное выражение для $F_k(x)$, получаем формулу для оценки средней объемной скорости тепловыделения:

$$F_k = \left(cm + Qm \frac{E}{RT_s^2} \right) \left(\frac{Qm}{2\lambda_s} + \frac{qm}{\lambda_s} \right). \quad (8)$$

Оценочные значения средней скорости тепловыделения F_k представлены на рис. 5 и в табл. 1 и 2 вместе с функциями $F(x)$ для газовой фазы. Видно, что для основного режима горения гексогена ($p > 0.1$ МПа) скорость тепловыделения в реакционном слое к-фазы всегда много больше скорости тепловыделения в газе. Видно также, что различие этих скоростей быстро увеличивается с ростом давления для изученных режимов. Формула (8) показывает, что величина F_k пропорциональна m^2 . Интересно отметить, что с ростом T_0 при фиксированном давлении значения F_k существенно уменьшаются.

Толщины реакционного слоя к-фазы l_r , рассчитанные по (7), также приведены в табл. 1 и 2. Видно, что значения l_r действительно составляют 5 ÷ 15 % от величины l . Это свидетельствует о том, что в к-фазе всегда имеют место узкие зоны реакций. Утверждения о том, что $F_k \gg F_0$ и что в к-фазе многих конденсированных веществ (порохов, монотоплив и смесевых систем) наблюдаются узкие зоны реакций, приводились, в частности, в работах [9, 12, 13].

4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Два режима горения гексогена

Данные, приведенные в табл. 1 и 2, и рис. 1–5 свидетельствуют о наличии у гексогена двух режимов горения — основного, при $p > 0.1$ МПа, и особого, при $p \leq 0.1$ МПа. Основной режим горения характеризуется большим тепловыделением в к-фазе Q с очень высокой скоростью тепловыделения в реакционном слое к-фазы F_k , относительно небольшим теплоподводом из газа в к-фазу q (сопоставимым при невысоких давлениях с Q) и широкими зонами

реакций в газовой фазе, на два порядка превышающими кондуктивный размер газовой фазы. Особый режим горения гексогена характеризуется эндозффектом в к-фазе и высоким теплоподводом из газа в к-фазу. Зоны реакций в газовой фазе особого режима остаются широкими. Режим назван особым потому, что до настоящего времени он наблюдался только при горении октогена. Исследовано около ста различных горючих веществ, и во всех наблюдался только основной режим. Это касается монотоплив (ПХА, октоген, нитрозоамин-Ц-2 — см. [2, 8, 19, 20]), баллистических [9, 12, 13, 20, 21] и смесевых порохов [9, 11, 13–18], всегда имеющих большое тепловыделение в к-фазе, относительно невысокий теплоподвод из газа в к-фазу и широкие зоны реакции в газовой фазе.

4.2. Одновременность процессов испарения и разложения на горячей поверхности

Из табл. 2 видно, что на нижнем пределе горения ($p = 0.05$ МПа) отрицательный тепловой эффект в к-фазе составляет $Q = -115$ кал/г, что соответствует теплоте испарения гексогена $Q_e = -113$ кал/г, оцениваемой как разность теплот сублимации и плавления. Эта величина близка к теплоте испарения, указанной в работе [22]. Поэтому можно полагать, что при $p = 0.05$ МПа весь процесс газификации гексогена в волне горения идет посредством испарения с поверхности, а в газовой фазе происходит его разложение, начинающееся сразу у поверхности (см. рис. 5). Затем, с ростом давления, тепловыделение в к-фазе увеличивается. Это означает, что часть гексогена экзотермически разложилась в реакционном слое к-фазы. Долю экзотермически разлагающегося гексогена можно оценить по формуле [4]

$$\zeta = (Q - Q_e)/(Q^* - Q_e), \quad (9)$$

где Q^* — максимальное тепловыделение в к-фазе, Q_e — теплота испарения гексогена. Значения Q^* для $T_0 = -100, 20, 100$ °С можно получить из табл. 1 и 2, если принять во внимание, что при высоких давлениях значения Q практически перестают расти с увеличением давления. Оценки дают следующие значения максимальных тепловыделений в к-фазе: $Q^* = 280, 240$ и 210 кал/г при $T_0 = -100, 20$ и 100 °С соответственно. Приведенные значения Q_e, Q^* и табличные значения Q позволили рассчитать параметр ζ для изученных условий.

Эти данные приведены в табл. 1 и 2. Видно, что с ростом давления от 0.05 до 0.1 МПа доля разложения ζ растет от 0 до 18 %, с ростом давления от 0.5 до 10 МПа увеличивается с 58 до 93 %, при высоких давлениях она близка к 100 %. Таким образом, одновременный процесс испарения и разложения в к-фазе горящего гексогена в особом режиме является по преимуществу испарением, а при повышенных давлениях основного режима — экзотермическим разложением. При изменении начальной температуры доля разложения почти не изменяется.

4.3. Макрокинетический закон газификации в волне горения

Полученные в экспериментах значения скорости горения m и температуры поверхности T_s при вариации давления и начальной температуры образцов (см. табл. 1 и 2) позволяют найти макрокинематику газификации в волне горения гексогена. Точное решение задачи связи m и T_s получено Б. И. Хайкиным посредством решения системы уравнений теплопроводности и диффузии реагентов для стабильно распространяющейся волны горения в к-фазе с учетом всех тепловых эффектов в волне, распространяющейся под совместным действием тепловыделения в к-фазе Q и теплоподвода из газа в к-фазу $q+q_r$ [9]. Решение этой задачи для первого порядка реакций в к-фазе по реагентам имеет вид

$$m_2 = \frac{\lambda_s \rho}{Q^2} \frac{RT_s^2}{E} k_0 Q^* \frac{1}{N} \exp\left(-\frac{E}{RT_s}\right), \quad (10)$$

где T_s дано в К, $N = 1/\eta_s + [(1 - \eta_s)/\eta_s] \ln(1 - \eta_s) - (q/Q) [\ln(1 - \eta_s)]/\eta_s$, $\eta_s = Q/Q^*$ — полнота реакции на поверхности к-фазы, E — эффективная энергия активации реакции в к-фазе. Для изученных горящих конденсированных веществ, включая гексоген, как показывают оценки, $N \cong 1$. Текущая скорость тепловыделения F_s в реакционном слое к-фазы принималась при получении решения (10) в виде функции

$$F_s(\eta, T) = Q^* k_0 \rho (1 - \eta) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (11)$$

где η — текущая полнота реакции в к-фазе, $\eta = \eta_s$ на поверхности, k_0 — предэкспонент. Обработка экспериментальных данных показывает, что экспоненциальный множитель в уравнении (10) играет настолько сильную роль, что

для описания экспериментальных результатов можно пользоваться упрощенным выражением

$$m = A \exp\left(-\frac{E}{2RT_s}\right),$$

где A — постоянная. Закон, связывающий m и T_s , назван макрокинетическим законом газификации (или пиролиза* — как это принято в западной литературе). Получаются следующие выражения:

$$m = 1.1 \cdot 10^4 \exp\left(-\frac{28000}{2RT_s}\right) \text{ при } T_s \leq 500 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (12)$$

$$m = 1.33 \cdot 10^7 \exp\left(-\frac{50000}{2RT_s}\right) \text{ при } T_s > 500 \text{ }^\circ\text{C},$$

здесь m дано в г/(см²·с), T — в К. Можно полагать, что полученные здесь значения энергии активации свидетельствуют о существенной роли испарения гексогена в реакционном слое до $p = 2 \div 5$ МПа в процессе горения, несмотря на большие положительные значения Q при $p > 0.1$ МПа. При этом имеет смысл говорить о лимитирующей роли процесса испарения гексогена в общем процессе газификации реакционного слоя. При $p > 2 \div 5$ МПа определяющим становится, по-видимому, процесс термического разложения, что отражается в увеличении энергии активации. Полученные макрокинетические законы газификации гексогена полностью совпадают с этими законами для октогена. Таким образом, уравнения (12) являются общими для этих циклических нитраминол.

4.4. Области волны, в основном определяющие (контролирующие) скорость горения

В основном режиме горения гексогена главным фактором, определяющим скорость горения, является тепловыделение в реакционном слое к-фазы с высокой скоростью. Некоторый вклад (особенно при невысоких давлениях) вносит теплоподвод из газа. Однако влияние различных зон газовой фазы на скорость

* Термин «пиролиз» представляется здесь неудачным, поскольку пиролиз, по определению, означает выжигание к-фазы тепловым потоком из газа. Очевидно, представленные данные указывают на отсутствие такого выжигания в основном режиме горения гексогена (и во всех режимах горения других монотоплив, порохов и смесевых систем).

горения неодинаково. Чтобы оценить, какая часть газовой фазы оказывает при $p > 0.1$ МПа наибольшее влияние на скорость горения, обратимся к следующему уравнению, полученному интегрированием уравнения теплопроводности по газовой фазе [9, 12, 23]:

$$mq = \int_0^{\infty} F(x) \exp\left(-\frac{x}{\vartheta}\right) dx, \quad (13)$$

где $F(x)$ — распределение скорости тепловыделения по газовой фазе. Вид подынтегрального выражения свидетельствует о том, что наиболее существенный вклад в скорость горения вносит лишь та область газовой фазы, толщина которой x ненамного больше кондуктивного размера газовой фазы ϑ . Действительно, при $x > \vartheta$ подынтегральное выражение быстро уменьшается с ростом x из-за экспоненциального множителя, что и означает слабое влияние тепловыделения при $x > \vartheta$.

Итак, областями, главным образом определяющими (контролирующими) скорость в волне горения гексогена при $p > 0.1$ МПа, являются область тепловыделения в реакционном слое к-фазы и в меньшей степени — небольшая часть газовой фазы вблизи поверхности горения, равная примерно кондуктивному размеру газовой фазы. Область высокотемпературных газовой фазы реакций даже в этой однозонной структуре практически не влияет на скорость горения из-за большого теплового сопротивления газовой фазы, имеющей, с одной стороны, относительно большие размеры, а с другой — низкую теплопроводность.

В особом режиме горения гексогена ($p < 0.1$ МПа) определяющая роль принадлежит теплоподводу из газа в к-фазу. Однако эта роль быстро ослабевает при возрастании давления выше 0.05 МПа, когда начинает увеличиваться тепловыделение в реакционном слое. К тому же, влияние газовой фазы здесь также ограничено, в основном низкотемпературной областью (см. рис. 5 и уравнение (13)).

4.5. О применимости модели горения порохов Я. Б. Зельдовича

Результаты, полученные Я. Б. Зельдовичем более 60 лет назад [24], методы и приемы научного анализа проблем горения актуальны до настоящего времени. В условиях почти полного отсутствия информации о структуре зон горения порохов Я. Б. Зельдович в

качестве примера сделал простейшие предположения о структуре волны горения пороха, с тем чтобы наполнить содержанием анализ проблемы. Он предложил следующую модель горения пороха: 1) тепловыделение в к-фазе отрицательно (по аналогии с существовавшим тогда представлением А. Ф. Беляева об испарении при горении легколетучих взрывчатых веществ) или теплонейтрально, 2) температура поверхности постоянна (T_s не зависит ни от p , ни от T_0), 3) покидающие горящую поверхность газы не реагируют вплоть до температуры пламени (т. е. распределение температуры в газовой фазе имеет михельсоновский вид), 4) всё тепловыделение происходит при температуре пламени, за счет которого и осуществляется газификация (пиролиз) к-фазы (т. е. газовая фаза имеет узкую зону реакции при температуре пламени). Очевидно, расстояние от поверхности до пламени в этой модели должно быть равно (или очень близко) кондуктивному размеру ϑ . Полувековой опыт изучения структур зон горения конденсированных веществ показал, что эти структуры значительно сложнее, чем предполагалось вначале. А именно, тепловыделение в к-фазе оказалось (как впервые показал П. Ф. Похил) существенно положительным, температура поверхности — переменной, зависящей от давления и начальной температуры, а тепловыделение в газовой фазе — распределенным по очень протяженной газовой фазе, причем скорость тепловыделения максимальна не вблизи температуры пламени, а, наоборот, вблизи поверхности. Размеры газовой фазы, даже для однозонных структур, составляют многие десятки и сотни михельсоновских размеров ϑ .

Особые режимы горения октогена и гексогена также не соответствуют этой модели, поскольку и при субатмосферных давлениях газовая фаза имеет широкую зону реакции, а скорость тепловыделения также максимальна не вблизи температуры пламени, а вблизи поверхности (см. рис. 5).

Еще раз подчеркнем тот факт, что широкие зоны реакции имеют место в однозонных структурах газовой фазы*.

*Необходимость этой фразы вызвана встречаемыми иногда ошибочными представлениями, что широкие зоны газовой фазы — это просто наличие второго пламени, например, у баллистических и смесевых порохов при низких давлениях, а первое пламя имеет узкую зону реакции.

Последние десятилетия экспериментально изучаются химические процессы в газовой фазе горящих конденсированных веществ методом микроотборников (см. [25, 26]). В работах [25, 26] показано, что реакции в газовой фазе горящих конденсированных веществ (в том числе и гексогена), а следовательно, и тепловыделение начинаются уже вблизи поверхности и идут по всей зоне. Существующие модели горения в газовой фазе (в том числе, в однозонных структурах) также строятся при учете переменной температуры по ходу процесса, т. е. в широких реакционных зонах [27]. Так широкие реакционные зоны наполняются химическим содержанием.

4.6. Каскадный режим тепловыделения при горении конденсированных веществ

Я. Б. Зельдович ясно показал, что решающим для характеристики процесса горения является вид функции скорости тепловыделения в волне. Представленные на рис. 5 кривые скорости тепловыделения гексогена в основном режиме горения позволяют назвать характер изменения этой характеристики каскадным. Действительно, максимальная скорость всегда достигается в реакционном слое к-фазы, как уже указывалось в п. 3.7. При выходе в газовую фазу скорость резко падает. И далее, по мере удаления от поверхности, скорость тепловыделения продолжает монотонно падать, вплоть до конца пламени. Каскадный характер падения скорости тепловыделения в процессе горения наблюдается во всех изученных (основных) режимах горения гексогена (и октогена). По-видимому, нет сомнения в том, что каскадный характер падения скорости тепловыделения в процессе горения имеет место для всех изученных конденсированных веществ: и для монотоплив, и для баллиститных, и для смесевых порохов. Даже для двухзонных структур газовой фазы (баллиститные и смесевые пороха при низких давлениях) нарушение монотонности падения скорости тепловыделения при переходе от первого пламени ко второму является несущественным, ибо скорость тепловыделения во втором пламени всегда много меньше, чем в первом.

4.7. Температурная чувствительность скорости горения гексогена

Чувствительность скорости горения к на-

Таблица 4
Температурная чувствительность скорости горения гексогена ($T_0 = 20^\circ\text{C}$)

p , МПа	β , %/град	k
0.5	0.2	0.74
1.0	0.22	0.89
2.0	0.19	0.85
5.0	0.15	0.75
8.0	0.14	0.72
10.0	0.13	0.68

чальной температуре определяется по формуле

$$\beta = \left(\frac{\partial \ln m}{\partial T_0} \right)_{p=\text{const}}$$

Обычно β находится графически с ошибкой $\Delta\beta = \pm 5\%$. Полученные значения чувствительности при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ приведены в табл. 4. Видно, что гексоген, как и октоген, характеризуется относительно низкими значениями β по сравнению, например, с баллиститными порохами [2, 9, 12]. Добавки этих нитрамино в баллиститные пороха существенно снижают значения β [28, 29]. Табл. 4 содержит также значения критерия устойчивости горения Зельдовича $k = \beta(T_s - T_0)$. Видно, что этот критерий предсказывает устойчивость горения гексогена в исследованных условиях, что и наблюдается в экспериментах. Ошибка вычисления критерия k составляет $\Delta k = \pm 6\%$.

ВЫВОДЫ

Результаты экспериментов показали, что газовая фаза имеет однозонную структуру. Установлено, что существует два режима горения гексогена: основной, при $p > 0.1$ МПа, и особый, при $p \leq 0.1$ МПа. Основной режим характеризуется большим тепловыделением в реакционном слое к-фазы, имеющим самую высокую скорость тепловыделения в волне горения, и относительно небольшим теплоподводом из газа в к-фазу. Для особого режима (который встречается только при горении гексогена и октогена) характерен отрицательный тепловой эффект в реакционном слое к-фазы и большой теплоподвод из газа. Оба режима имеют

широкие зоны реакции в газовой фазе. Скорость горения в основном режиме определяется главным образом тепловыделением в реакционном слое к-фазы и в меньшей степени — теплоподводом из небольшой области газовой фазы, прилегающей к поверхности и имеющей кондуктивный размер газовой фазы. В особом режиме скорость горения определяется теплоподводом из газа. Показано, что на горячей поверхности одновременно протекают процессы испарения и разложения к-фазы, причем при низких давлениях это преимущественно испарение, а с ростом давления идет быстрое нарастание доли экзотермического термического разложения; при повышенных давлениях на поверхности происходит в основном термическое разложение. Найдены законы газификации (пиролиза) гексогена в волне горения, которые оказались такими же, как и для октогена. Отмечается, что модель Я. Б. Зельдовича (1942 г.) неприменима к горению монотоплив (ПХА, октоген, гексоген, и др.), баллистических и смесевых порохов. Характер изменения скорости тепловыделения по волне горения гексогена предложено называть каскадным (в основном режиме). Получено, что гексоген обладает низкой чувствительностью скорости горения к начальной температуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Boggs T. L.** The thermal behavior of cyclotrimethylenetrinitramine (RDX) and cyclotetramethylenetetranitramine (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; V. 90).
2. **Zenin A. A.** HMX and RDX: combustion mechanism and influence on modern double-base propellant combustion // *J. Propulsion and Power*. 1995. V. 11, N 4. P. 752–758.
3. **Zenin A. A., Puchkov V. M., Finjakov S. V.** Combustion mechanism of nitramines as monopropellants and as additives to double-base propellants // *Aerotecnica Missile Spazio / Revista dell'Associazione Italiana di Aeronautica and Astronautica*. 1995. V. 7, N 3–4.
4. **Zenin A. A., Puchkov V. M., Finjakov S. V., Kusnezov G. P.** Burning wave parameters and nitramine combustion mechanism // 26th Symp. (Intern.) on Combustion: Proc. of Accepted Papers. Napoli. The Combustion Inst., 1996. P. 752–758.
5. **DeLuca L. T., Cozzi F., Germiniasi G., et al.** Combustion mechanism of an RDX-based composite propellant // *Combust. Flame*. 1999. V. 118. P. 248–261.
6. **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. Technol.* 1988. V. 57, N 1. P. 1–15.
7. **Raman K. V., Singh H.** Ballistic modification of RDX-based CMDB propellants // *Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. 1988. V. 13. P. 149–151.
8. **Зенин А. А., Пучков В. М., Финяков С. В.** Характеристики волн горения октогена при различных давлениях и начальных температурах // *Физика горения и взрыва*. 1998. Т. 34, № 2. С. 59–66.
9. **Зенин А. А.** Экспериментальное исследование механизма горения ТРТ и течения продуктов их сгорания: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1976.
10. **Финяков С. В.** Исследование механизма горения порохов при обдуве горячей поверхности: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1992.
11. **Лейпунский О. И., Зенин А. А., Пучков В. М.** Влияние катализатора на характеристики зоны горения конденсированного вещества // *Горение и взрыв: Третий Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву: Сб. М.: Наука*, 1972. С. 74–77.
12. **Зенин А. А.** Процессы в зонах горения баллистических порохов // *Физические процессы при горении и взрыве: Сб. М.: Атомиздат*, 1980. С. 68–104.
13. **Zenin A. A.** Thermophysics of stable combustion waves of solid propellants // *Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants* / L. DeLuca, E. W. Price, M. Summerfield (Eds). Washington, DC: AIAA, 1992. Ch. 6. P. 197–231. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 143).
14. **Zenin A. A., Finjakov S. V.** Physics of combustion of HTPB/nitramine compositions // *Energetic Materials: 32nd Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, FRG*, 2001. P. 8,1–8,24.
15. **Zenin A. A., Finjakov S. V.** Physics of combustion of energetic binder-nitramine mixtures // *Energetic Materials: 33rd Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, FRG*, 2002. P. 7,1–7,14.
16. **Zenin A. A., Finjakov S. V.** Combustion mechanism of new polymer/oxidizer compositions // *Energetic Materials: 34th Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, FRG*, 2003. P. 54,1–54,13.
17. **Zenin A. A., Finjakov S. V.** Physics of combustion of solid mixtures with active binder and new oxidizer // *Energetic Materials: 35th Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, FRG*, 2004. P. 144,1–144,16.
18. **Zenin A. A., Finjakov S. V.** Physico-kinetical combustion mechanisms of new solid mixture compositions // *Energetic Materials: 36th Intern.*

- Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, FRG, 2005. P. 157,1–157,16.
19. **Зенин А. А., Боболев В. К., Лейпунский О. И., Глазкова А. П.** Исследование распределения температуры при горении перхлората аммония // ПМТФ. 1964. № 3. С. 154–158.
 20. **Zenin A. A., Finjakov S. V., Ibragimov N. G.** Physics of nitrozoamine combustion: as a monopropellant and as an ingredient of modern propellants // Energetic Materials: 30th Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, FRG, 1999. P. 51,1–51,13.
 21. **Зенин А. А.** Структура температурного распределения при стационарном горении баллистического пороха // Физика горения и взрыва. 1966. Т. 2, № 3. С. 67–76.
 22. **Максимов Ю. А.** Температура кипения и энтальпия испарения жидких гексогена и октогена // Журн. физ. химии. 1992. Т. 66, вып. 2. С. 540–542.
 23. **Барсуков В. Д., Нелаев В. П.** О тепловом влиянии зон химического превращения на скорость горения конденсированной системы // Инж.-физ. журн. 1975. Т. XXIX, № 6. С. 989–993.
 24. **Зельдович Я. Б.** К теории горения порохов и взрывчатых веществ // ЖЭТФ. 1942. Т. 12, вып. 11–12. С. 498–524.
 25. **Korobeinichev O. P.** Flame structure of solid propellants // Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics / Yang V., Brill T. B., Ren W. Zh. (Eds). Restononlinebreak Virginia: AIAA, 2000. Ch. 2.3. P. 335–354. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 185).
 26. **Paletsky A. A., Korobeinichev O. P.** Study of the flame structure of ADN/HTPB composite propellants using molecular-beam mass-spectrometry // Energetic Materials: 29th Intern. Annu. Conf. of ICT, Karlsruhe, FRG, 1998. P. 156,1–156,11.
 27. **Miller M. S., Anderson W. R.** Energetic-material combustion modeling with elementary gas-phase reactions: a practical approach // Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics / Yang V., Brill T. B., Ren W. Zh. (Eds). Reston, Virginia: AIAA, 2000. Ch. 2.12. P. 501–531. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 185).
 28. **Зенин А. А., Финяков С. В., Пучков В. М., Ибрагимов Н. Г.** Температурные коэффициенты параметров волн горения порохов, содержащих нитрамини // Хим. физика. 1999. Т. 18, № 9. С. 73–81.
 29. **Zenin A. A., Finjakov S. V., Puchkov V. M., Ibragimov N. G.** Temperature and pressure sensitivities of burning wave parameters of nitramine-containing propellants and HMX // J. Propulsion and Power. 1999. V. 15, N 6. P. 753–758.

*Поступила в редакцию 11/V 2005 г.,
в окончательном варианте — 26/IV 2006 г.*