

УДК 536.46

ОЧАГОВЫЙ МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ НИТРОГЛИЦЕРИНОВОГО ПОРОХА

© 2023 г. В. Н. Маршаков^{1*}, В. Г. Крупкин¹¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: marsh_35@mail.ru

Поступила в редакцию 25.07.2022;

после доработки 16.08.2022;

принята в печать 22.08.2022

Исследован очаговый механизм горения баллиститного пороха марки НБ при атмосферном давлении с помощью кинофотосъемки и термопарных измерений. Изучена динамика развития очага – поперечной волны ограниченной протяженности, распространяющейся вдоль поверхности образца. Измерены локальные фронтальные и нормальные скорости распространения поперечной волны горения в зависимости от времени. Из анализа температурных распределений в конденсированной фазе волны, полученных с использованием термопар, определены нормальные скорости горения и рассчитаны соответствующие им температуры горячей поверхности. Полученный разброс скоростей объясняется эволюцией профиля фронта поперечной волны, проходящего термопару. С учетом изменения во времени этих скоростей горения построено наблюдаемое распределение температур прогретого слоя конденсированной фазы. При анализе механизма распространения поперечных волн привлекались данные о параметрах волны и их зависимостях от давления и средней скорости горения из предшествующих работ авторов.

Ключевые слова: двухосновный порох, очаговый механизм, поперечные волны, скорость горения, температурный профиль к-фазы.

DOI: 10.31857/S0207401X23030111, EDN: NBTZIS

ВВЕДЕНИЕ

В ранних исследованиях неоднородного фронта горения нитроглицериновых порохов [1–4] механизм горения рассматривался как “очагово-пульсирующий”. Под термином, предложенным в работе [1], имелась в виду совокупность взаимодействующих участков поверхности образца, сгорающих в пульсирующем режиме. Дальнейшие исследования [5–18] показали, что очаг – это поперечная волна (ПВ) с пологим фронтальным профилем, которая распространяется вдоль поверхности горения со скоростью, в несколько раз большей, чем скорость горения по нормали к поверхности. В экспериментах измерялись: L – размер очага, V_r – локальные скорости распространения фронта ПВ по поверхности, U_n – локальные скорости по нормали к профилю, U_f – вертикальные смещения профиля, U – средняя скорость сгорания образца в целом. Рассмотрим результаты этих исследований.

Очаги – поперечные волны имеют неправильную форму, которая меняется со временем, и их размер зависит от давления. Данные видеосъемки и анализ погашенных образцов позволяют оценить их размеры. Размеры очагов по их максимальной (характерному) величине в зависимости

от давления оценивается по выражению $L_m = 2.6p^{-0.76}$, где L_m – в мм, p – в атм, $1 \leq p \leq 60$ атм, а в зависимости от средней нормальной скорости U горения образца в целом по выражению $L_m = 2.6U^{-1.17}$, (U – в мм/с), $0.7 \leq U \leq 12$ мм/с. Средний по поверхности эквивалентный диаметр очага описывается аналогичными зависимостями: $L_d = 2.34p^{-0.74}$ и $L_d = 2.0U^{-1.1}$. В частности, для погашенных образцов были получены следующие размеры: ~3 мм при 1 атм, 0.4–0.7 мм при 6 атм и 0.1–0.18 мм при 40 атм.

Интересно рассмотреть соотношения между критическим диаметром и размером очага. В работах [9, 11, 13] получены зависимости критического диаметра от средней скорости горения: для образцов пороха марки НБ с теплоотводящей обоймой $D_{1\ cr} = 6U^{-1.17}$ при $0.7 \leq U \leq 12$ мм/с (здесь и ниже D_{cr} – в мм); для образцов, горящих в азоте (без обоймы) $D_{2\ cr} = 5.4U^{-1.17}$ (например, при $p = 1$ атм, $U = 0.7$ мм/с, $D_{1\ cr} = 9.1$ мм и $D_{2\ cr} = 8.2$ мм). Заметим, что значения диаметров $D_{1\ cr}$ и $D_{2\ cr}$ различаются на двойную толщину “чулка” – слоя погашенного пороха на обойме.

Сопоставление размеров критического диаметра и очага дает $D_{1\ cr}/L_m = 6/2.6 = 2.3$ и $D_{1\ cr}/L_d =$

$= 6/2 = 3$. Это означает, что если по диаметру образца располагается меньше трех очагов, то горение прерывается. Таким образом, данные о критическом диаметре дают представление о размерах очага – поперечной волны.

Полученные данные [5–18] по локальным скоростям горения будут рассмотрены ниже при изложении результатов настоящих исследований, целью которых было получение дополнительных данных о механизме и скоростях горения, необходимых при расчетах переходных процессов.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовались образцы нитроглицеринового пороха марки НБ (58% коллоксилина + 40% нитроглицерина + стабилизатор + пластификатор) в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами ширина \times глубина \times высота = $12 \times 6 \times 16$ мм. Образцы не бронировались и сжигались при атмосферном давлении в струе азота для предотвращения возникновения вторичного газового факела. Поджиг осуществлялся накаленной нихромовой спиралью диаметром 6.5 мм и длиной 15 мм, которая размещалась на высоте 2–3 мм над поверхностью образца и удалялась после его воспламенения.

Для регистрации температуры применялись угловые вольфрам-рениевые термопары ВР5/ВР20 диаметром 15 мкм, для которых допустимый предел измерений составлял 2500–3000 °С. Экспериментальный образец изготавливался из двух одинаковых пороховых пластин толщиной 3 мм, между которыми размещалась термопара. Склейка образца проводилась с помощью ацетона.

Сигнал с термопары с помощью многофункционального аналого-цифрового преобразователя Е-270 производства ЗАО “Л-КАРД” (Россия) и пакета программного обеспечения PowerGraph выводился на экран ПК (цифровой осциллограф). Погрешность измерения температуры такой термопарой составляет ± 2.2 °С в диапазоне измерений от 0 до 293 °С и $\pm (0.0075|T|)$, где T – измеренная температура в °С, в диапазоне измерений 293–2500 °С.

Процесс распространения горения по поверхности образца пороха НБ регистрировался цифровой видеокамерой KYT-U400-MCS0660R01 компании Kayeton Technol. Co., Ltd. (China) с переменным фокусным расстоянием от 6 до 60 мм со скоростью съемки 50, 100 или 330 кадров/с и с разрешением 1920×1080 MJPEG при частоте 50 кадров/с. Последовательный анализ и обсчет изображений горячей поверхности образца на кадрах фильма позволял получать количественные данные о локальных и средних скоростях распространения пламени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 приведены шесть кадров видеопленки, полученных с интервалом в 0.2 с при горении образца пороха НБ при давлении 1 атм в потоке азота. Оптическая ось видеокамеры направлена на образец под углом 54° к горизонту и перпендикулярна горизонтали фокальной поверхности образца. Фрагмент образца представляет собой его правую половину и примерно верхнюю треть его высоты.

На первом кадре на боковой поверхности образца белыми вертикальными штрихами обозначен начальный размер очага – поперечной волны, развитие которого демонстрируют последующие кадры. Светящееся образование – раскаленные углеродистые волокна, образовавшиеся на профиле ПВ, поднятые продуктами сгорания и держащиеся на фронте ПВ на поверхности образца. Развитие очага на боковой поверхности образца представлено на рис. 2. Цифрами 1–5 помечены профили разгорающегося очага с интервалом в 0.2 с, 6 – часть профиля соседнего очага, пришедшего слева. Вертикальные отрезки прямых над профилем 1 соответствуют белым штрихам на 1-ом кадре рис. 1. Значения параметров профилей очагов представлены в табл. 1, где U_n и U_h – нормальная и вертикальная локальные скорости распространения фронта ПВ – V_r , а h – высота профиля. Точки 1–4 измерения U_n выбраны так, чтобы показать разброс их величин на профиле ПВ. Средняя скорость сгорания слоя за 1 с от “дна” 1-го очага до дна 6-го равна $U_h \sim 1.0$ мм/с; при средней скорости сгорания образца в целом ($H = 16$ мм) $U = 0.6$ мм/с при $p = 1$ атм. Ранее нами для давлений $5 \geq p \geq 120$ атм была получена зависимость $U = 0.9p^{0.65}$.

Заметим, что при расчете вертикальной скорости U_h очага (рис. 2) разброс ее значений составлял $0 \leq U_h \leq 3$ мм/с при характерной толщине прогретого слоя конденсированной (к) фазы $\delta = 0.5$ мм при $U = 0.2$ мм/с и $\delta = 0.1$ мм при $U = 1$ мм/с и коэффициенте температуропроводности $\alpha = 0.1$ мм²/с.

По кадрам этого же видеопленки были проведены измерения вертикальной скорости перемещения центральной точки поверхности при горении за временные интервалы в 1, 2, 4 и 16 с. Величина перемещения этой точки с шагом 1 с показана на рис. 3, а скорости горения в зависимости от интервалов измерения – на рис. 4.

Измерения на протяжении 16 с при указанных выше временных интервалах показывают следующее:

1 с – разброс значений скоростей $0.2 \leq U_h \leq 1.1$ мм/с на базах $0.2 \geq h \geq 1$ мм;

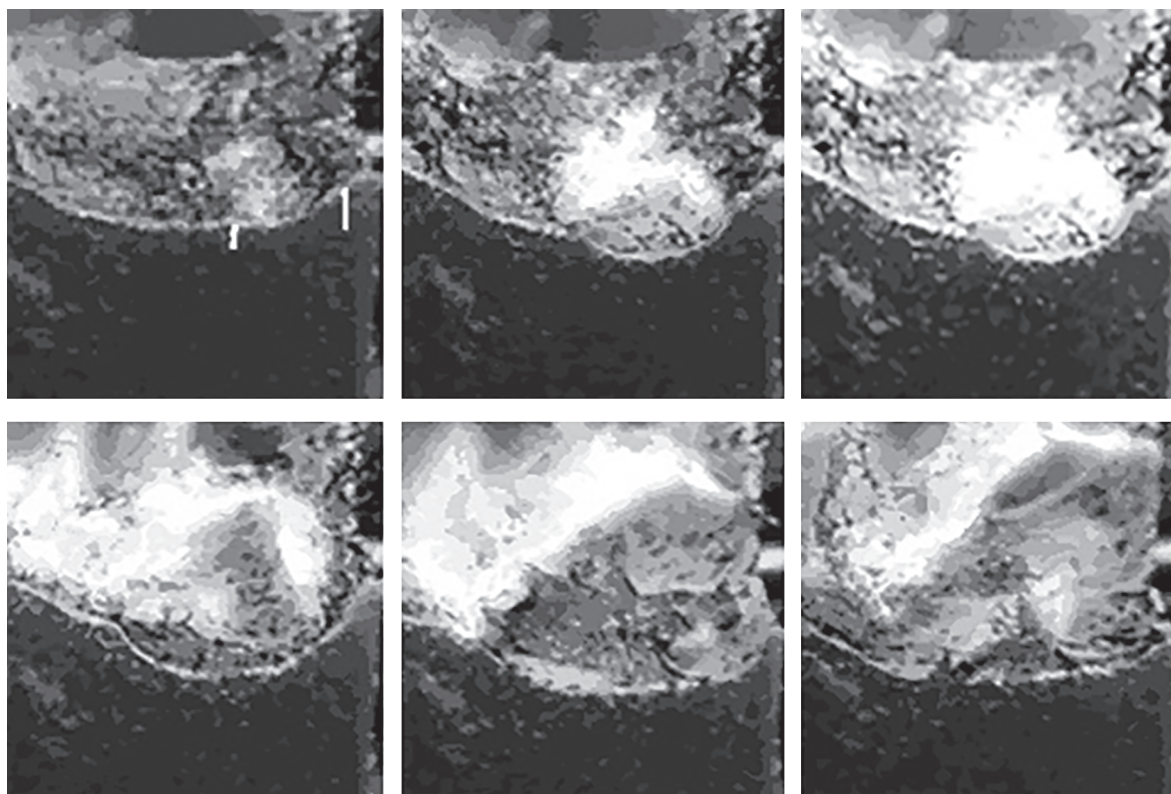


Рис. 1. Фрагменты шести последовательных кадров видеофильма горячей поверхности пороха НБ с интервалом в 0.2 с.

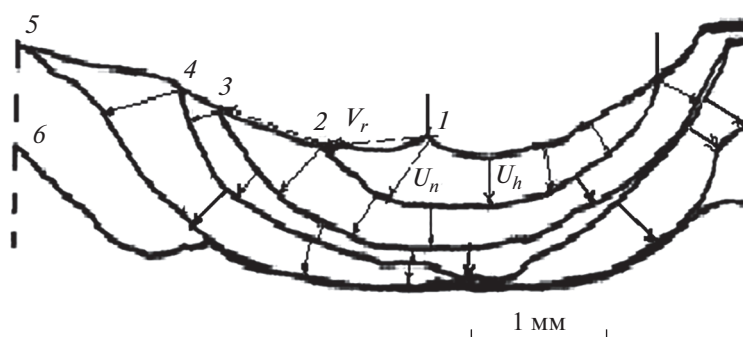


Рис. 2. Распространение профиля очага по боковой поверхности образца с шагом в 0.2 с.

2 с – разброс значений скоростей $0.35 \leq U_h \leq 0.95$ мм/с на базах $0.7 \geq h \geq 2$ мм;

4 с – разброс значений скоростей $0.4 \leq U_h \leq 0.67$ мм/с на базах $1.6 \geq h \geq 2.5$ мм;

16 с – $U_h = 0.56$ мм/с на базе 9 мм.

Таким образом, пок кадровый анализ поверхности горения пороха позволил получить динамику развития очагов и распределение в очаге локальных скоростей. Определены также средние скорости выгорания пороха в зависимости от временных интервалов их измерения.

Для расчета детальной структуры профиля поперечной волны в конденсированной фазе была применена термодинамическая методика. Путем анализа температурных распределений в конденсированной фазе волны горения, полученных с помощью термопар (см. постановку эксперимента), была рассчитана детальная структура зоны прогрева к-фазы. Заметим, что в экспериментах использовались угольковые термопары, так как они, как и П-образные, не требуют внесения поправок на теплотери при прохождении к-фазы [19], но при этом объективнее регистрируют распределе-

Таблица 1. Значения основных параметров, характеризующих динамику развития очага

$h, \text{ мм}$	$U_h, \text{ мм/с}$	U_{n1}^a	U_{n2}^b	U_{n3}^c	U_{n4}^d
		мм/с			
0.37	1.8	2.8	2.5	1.3	3.0
0.33	1.7	1.3	1.76	1.5	1.85
0.09	0.46	1.76	1.7	0.65	1.4
0.17	0.8		1.1	0.46	0.8
					1.9
					1.6
					2.3

Примечание: жирным шрифтом представлены данные для правого профиля очага.

^a $V_r = 3.9 \text{ мм/с}$.

^b $V_r = 4.4 \text{ мм/с}$.

^c $V_r = 1.8 \text{ мм/с}$.

^d $V_r = 6.1 \text{ мм/с}$.

ние температур в к-фазе ПВ, распространяющейся вдоль поверхности образца.

На рис. 5 представлены температурные распределения, полученные в экспериментах с горением образцов в потоке азота при атмосферном давлении. По мере приближения термопары к поверхности горения наблюдается монотонный рост температуры, при выходе термопары на горящую поверхность регистрируется характерное кратковременное температурное плато, затем в газовой зоне прогрева волны горения монотонный рост температуры возобновляется (см. вставку на рис. 5). В дальнейшем термопара выходит в поток реагирующих продуктов сгорания пороха, что сопровождается характерными крупномасштабными колебаниями температуры. В первом эксперименте (кривая 1 на рис. 5) зафиксирована

температура поверхности $T_s \sim 195^\circ\text{C}$, во втором (кривая 2) — $T_s \sim 215^\circ\text{C}$.

Прежде чем анализировать распределение температур в к-фазе волны горения, отметим следующее. Поперечная волна, распространяясь вдоль поверхности образца, имеет непрерывно трансформирующийся пологий профиль фронта горения, так как она распространяется по предварительно прогретому слою топлив и верхняя часть ее профиля перемещается быстрее, чем нижняя. Время регистрации температуры в к-фазе равно примерно 1.5 с, и за это время термопара может зафиксировать участки температурных профилей, изменяющихся при прохождении ПВ.

На рис. 6 температурное распределение $T(t)$ для 1-й термопары рис. 5 (кривая 1) перестроено в полулогарифмических координатах. Начало координат по оси абсцисс перенесено на момент выхода термопары на горящую поверхность. Вид новой зависимости позволяет выявить на отдельных временных отрезках a, b, c и d прямолинейные участки, режим горения на которых можно считать близким к квазистационарному, а изменение температуры в нем подчиняется михельсоновскому профилю:

$$T_2 - T_0 = (T_1 - T_0) \exp\left\{-\frac{U^2(t_2 - t_1)}{\alpha}\right\}.$$

После аппроксимации выделенного i -того прямолинейного участка зависимости $\ln(T - T_0) = k_i t + B_i$ с помощью коэффициентов k_i можно рассчитать на этом участке эффективную скорость горения $U_i = (k_i \alpha)^{1/2}$. Отметим, что выделенные временные интервалы квазистационарного горения значительно больше характерного времени релаксации теплового слоя с вычисленной скоростью горения: $\tau_i = \alpha / U_i^2$.

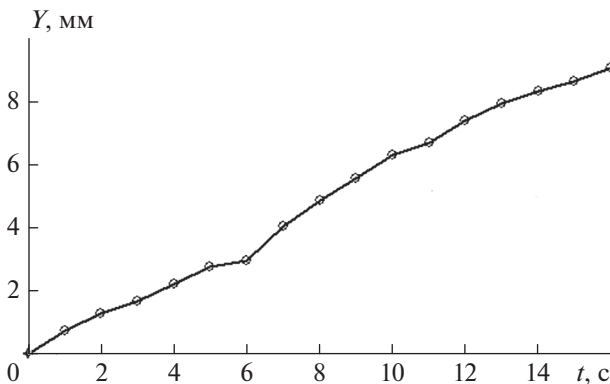


Рис. 3. Глубина выгорания пороха в центре образца, h , измеренная с интервалом в 1 с.

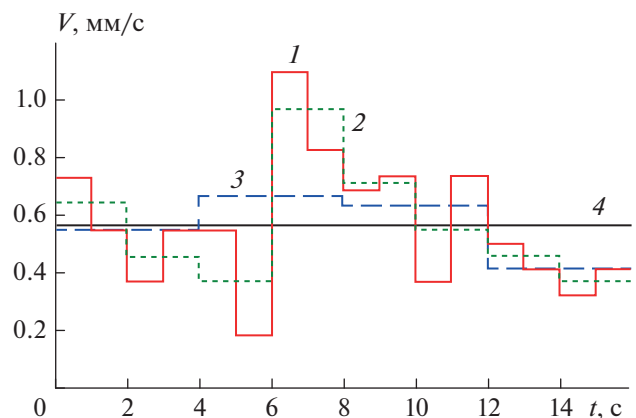


Рис. 4. Средние скорости горения по вертикали в зависимости от временных интервалов измерения: 1 — 1 с, 2 — 2 с, 3 — 4 с, 4 — 16 с.

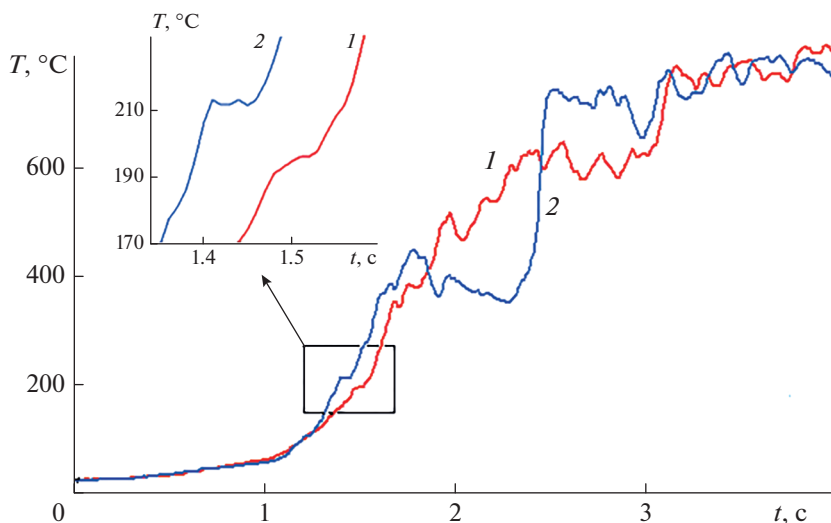


Рис. 5. Запись показаний термопар горящих образцов пороха НБ при атмосферном давлении. Кривые 1 и 2 соответствуют двум опытам, проведенным в аналогичных условиях. На вставке – момент выхода термопары на горящую поверхность.

Оценки температуры поверхности горения, T_s , соответствующие прямолинейным участкам с определенными скоростями горения, были получены в соответствии с однозначной зависимостью скорости нормального горения от температуры поверхности для пороха НБ [20]: $U = 1.125 \cdot 10^4 \exp[-5000/(T_s + 273)]$, где U – в мм/с и T_s – в °С. В результате для 1-й термопары рис. 5 и временных отрезков *a*, *b*, *c* и *d* (рис. 6):

- a*) $-0.22 \leq t \leq -0.02$ с, $112 \leq T \leq 192$ °С, $k_a = 2.8449$, $U_a = 0.53$ мм/с, $T_s = 211$ °С;
- b*) $-0.42 \leq t \leq -0.24$ с, $70 \leq T \leq 112$ °С, $k_b = 3.5054$, $U_b = 0.59$ мм/с, $T_s = 216$ °С;
- c*) $-0.61 \leq t \leq -0.44$ с, $54 \leq T \leq 68$ °С, $k_c = 1.6940$, $U_c = 0.41$ мм/с, $T_s = 198$ °С;
- d*) $-1.40 \leq t \leq -0.64$ с, $24 \leq T \leq 53$ °С, $k_d = 2.4171$, $U_d = 0.49$ мм/с, $T_s = 207$ °С.

Усредненные значения U и T_s во временном и температурном интервалах $-1.40 \leq t \leq 0$ с, $24 \leq T \leq 196$ °С при $k = 2.5155$ равны $U = 0.50$ мм/с и $T_s = 208$ °С.

Аналогичным образом для 2-й термопары рис. 5 было получено:

- a*) $-0.20 \leq t \leq -0.05$ с, $110 \leq T \leq 213$ °С, $k_a = 5.5444$, $U_a = 0.71$ мм/с, $T_s = 226$ °С;
- b*) $-0.38 \leq t \leq -0.28$ с, $62 \leq T \leq 91$ °С, $k_b = 5.3988$, $U_b = 0.73$ мм/с, $T_s = 227$ °С;
- c*) $-0.79 \leq t \leq -0.49$ с, $43 \leq T \leq 53$ °С, $k_c = 1.2803$, $U_c = 0.36$ мм/с, $T_s = 191$ °С;
- d*) $-1.13 \leq t \leq -0.89$ с, $27 \leq T \leq 36$ °С, $k_d = 3.3608$, $U_d = 0.58$ мм/с, $T_s = 214$ °С.

Усредненные значения U и T_s во временном и температурном интервалах $-1.5 \leq t \leq 0$ с и $20 \leq T \leq 213$ °С, $k = 2.6703$ равны $U = 0.52$ мм/с и $T_s = 209$ °С.

На рис. 7 представлены термограмма, записанная 1-й термопарой (ромбы), рассчитанное распределение температур на временных интервалах *a*, *b*, *c*, *d* (жирная кривая) и распределение температур, рассчитанное с учетом средней скорости горения в *k*-фазе (тонкая кривая), а рис. 8 показывает то же распределение температур в *k*-фазе, но в зависимости от расстояния *x*. Рисунок 7 по-

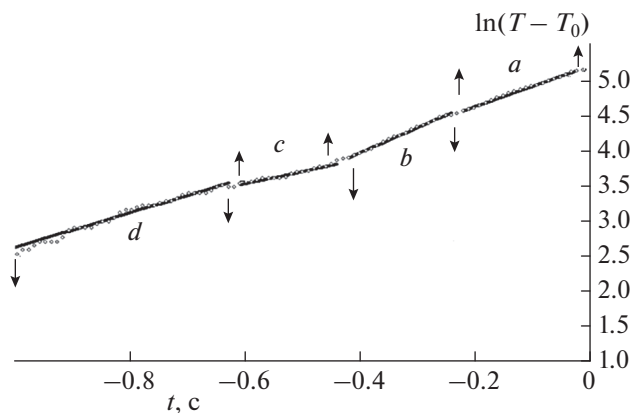


Рис. 6. Температурное распределение, представленное на рис. 5 (термограмма 1), в полулогарифмических координатах с выделением прямолинейных отрезков *a*, *b*, *c*, *d*; \circ – экспериментальные точки, сплошная кривая – линейные аппроксимации.

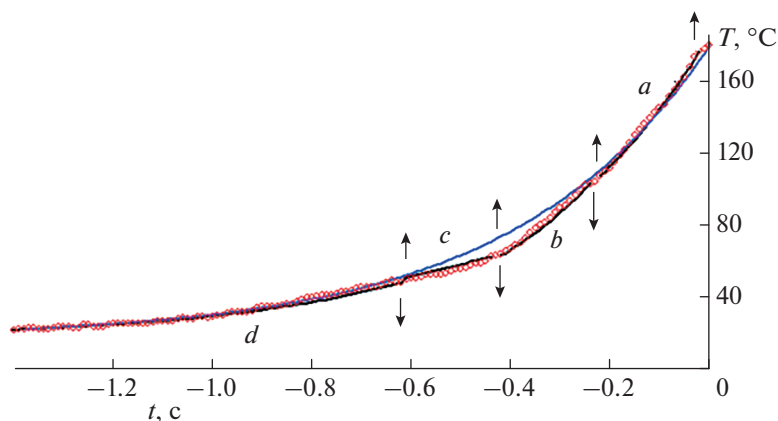


Рис. 7. Распределение температур во времени, полученное 1-й термопарой в к-фазе волны горения: точки (\diamond) – экспериментальные данные, 1 – кусочная аппроксимация, 2 – усредненная аппроксимация.

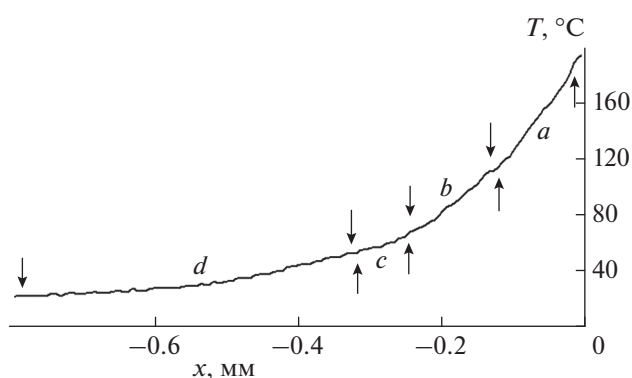


Рис. 8. Распределение температур в к-фазе волны горения в зависимости от расстояния, полученное 1-й термопарой.

казывает хорошее соответствие расчетных кусочных аппроксимаций эксперименту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нитроглицериновый порох НБ при давлениях 1–60 атм горит в очаговом режиме. Очаг формируется поперечной волной с пологим профилем фронта горения. Скорость распространения фронта по поверхности образца изменяется в широком интервале: $2 < V_r < 6$ мм/с (в частности, при атмосферном давлении $V_r \sim 2.0$ – 2.7 мм/с), и зависит от давления как $V_r = 4.3p^{0.24}$ [данная работа, 4, 15, 16].

На фронтальном профиле волны скорость также изменяется: например $0.3 < U_n < 1.6$ мм/с при $V_r = 2.6$ мм/с или $0.4 < U_n < 3$ мм/с при $V_r = 6$ мм/с. Вертикальная скорость сгорания нижней части профиля (дна очага) может изменяться по мере распространения очага в пределах от 1 до 0.13 мм/с или до нуля при погасании.

Средняя вертикальная скорость горения для произвольной точки на поверхности зависит от базы измерения и разброс скоростей на базе до 1 мм составляет $0.2 \leq U_h \leq 1.1$ мм/с, $0.4 \leq U_h \leq 0.67$ мм/с на базе до 3 мм и $U_h = 0.56$ мм/с на базе 9 мм. Средняя скорость сгорания образца в целом равна $U = 0.6$ мм/с при $p = 1$ атм, а для давлений $5 \leq p \leq 120$ атм была получена зависимость $U_{av} = 0.9p^{0.65}$.

Оценки размеров очагов по их характерному (максимальному) размеру описываются следующей зависимостью от давления: $L_m = 2.6p^{-0.76}$ (при $1 \leq p \leq 60$ атм), а от средней скорости – зависимостью $L_m = 2.6U^{-1.17}$ (при $0.7 \leq U \leq 12$ мм/с). Критический диаметр горения образца связан с максимальным (характерным) размером очага соотношением $D_{cr} \approx 3L_m$, при меньшем количестве очагов образец гаснет.

Настоящая работа была выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований РФ “Процессы горения и взрыва” (регистрационный номер 122040500073-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синаев К.И. // Тез. докл. I Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. М.: Наука, 1968. С. 59.
2. Кочаков В.Д., Синаев К.И. // Физика горения и методы ее исследования. Вып. 5. Чебоксары: Чувашский ГУ, 1975. С. 118.
3. Абруков С.А., Аверсон А.Э. и др. // Матер. V Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Горение конденсированных систем. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1977. С. 69.
4. Маршаков В.Н. // Хим. физика. 1987. Т. 6. № 4. С. 530.
5. Ананьев А.В., Истратов А.Г. и др. // Хим. физика. 2001. Т. 20. № 12. С. 47.
6. Маршаков В.Н., Истратов А.Г., Пучков В.М. // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 4. С. 100.

7. *Marshakov V.N., Istratov A.G.* // Intern. Conf. on Combustion and Detonation. Zel'dovich Memorial, 2004. Moscow: TORUS PRESS Ltd., 2004. Paper W2-2. 11 P.
8. *Истратов А.Г., Маршаков В.Н.* // Хим. физика. 2006. Т. 25. № 5. С.37.
9. *Маршаков В.Н., Истратов А.Г.* // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 2. С. 72.
10. *Маршаков В.Н., Пучков В.М.* // Горение и взрыв / Под ред. Фролова С.М. Вып. 2. М.: Торус Пресс, 2009. С. 93.
11. *Маршаков В.Н., Колесников-Свинарев В.И., Финяков С.В.* // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 2. С. 30.
12. *Маршаков В.Н.* // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 12. С. 61.
13. *Маршаков В.Н.* // Горение и взрыв / Под ред. Фролова С.М. Вып. 7. М.: Торус Пресс, 2014. С. 299.
14. *Маршаков В.Н.* // Горение и взрыв. 2016. Т. 9. № 3. С. 124.
15. *Маршаков В.Н., Финяков С.В.* // Хим. физика. 2017. Т. 36. № 6. С. 24; <https://doi.org/10.7868/S0207401X17060103>
16. *Крупкин В.Г., Маршаков В.Н., Рашковский С.А.* // Горение и взрыв. 2019. Т. 12. № 1. С. 90; <https://doi.org/10.30826/CE19120111>
17. *Рашковский С.А., Крупкин В.Г., Маршаков В.Н.* // Горение и взрыв. 2019. Т. 12. № 4. С. 116.
18. *Маршаков В.Н., Крупкин В.Г., Рашковский С.А.* // Горение и взрыв. 2020. Т. 13. № 1. С.124.
19. *Зенин А.А.* Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М.: ИХФ РАН СССР, 1976.
20. *Зенин А.А.* Физические процессы при горении и взрыве. М.: Атомиздат, 1980. С. 68.