

## ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 536.45

### МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ ОКТОГЕНА

© 2020 г. В. Н. Маршаков<sup>1\*</sup>, В. Г. Крупкин<sup>1</sup>, С. А. Рашковский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: marsh\_35@mail.ru

Поступила в редакцию 27.03.2020;

после доработки 27.03.2020;

принята в печать 20.05.2020

Исследован механизм горения октогена при давлениях 0.5–50 атм. Показано, что октоген горит в очаговом режиме. Определен масштаб неоднородности поверхности горения – характерный размер очагов. Получена зависимость размера очагов от средней скорости горения образца. Показано, что этот механизм аналогичен очаговому режиму горения баллистических порохов с некоторыми особенностями, связанными с наличием расплавленного слоя в к-фазе: значительно более высокая температура в зоне пламени и отсутствие углеродистого каркаса на поверхности горения.

*Ключевые слова:* октоген, неоднородный фронт горения, очаговый механизм, поперечные волны, скорость горения, размер очагов.

DOI: 10.31857/S0207401X20110114

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования механизма горения октогена (НМХ) ведутся уже более двадцати лет. При этом механизм горения рассматривается как квазистационарный и одномерный в волне горения как в конденсированной (к), так и в газовой (в пламени) фазах [1–12]. Хотя в ряде работ отмечались, особенно при низких давлениях, неустойчивость режима [7] и колебания температуры в зоне пламени [1–3, 11], а также скорости оттока продуктов горения и их светимости [12].

Цель настоящей работы – исследование очагового механизма горения октогена при давлениях 0.5–50 атм.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### *Методика эксперимента*

Проведено исследование механизма горения НМХ–(C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>N<sub>8</sub>O<sub>8</sub>) со следующими характеристиками: молярный вес – 296.2 кг/кмоль, теплота образования – 254 кДж/кг, теплота взрыва – 6030 кДж/кг, плотность монокристалла – 1.96 г/см<sup>3</sup>, температура плавления – 280°C. Образцы из полидисперсного порошка с размером частиц не более 400 мкм изготавливались путем глухого прессования до плотности 1.8–1.93 г/см<sup>3</sup> в виде цилиндров диаметром 10 или 12 мм, либо прямоугольных параллелепипедов с размерами 10 × 15 мм и высотой 3.5–10 мм.

Поджиг образцов осуществлялся через промежуточный конус или пирамиду из пластичной массы, приготовленной из быстрогорящего состава на основе перхлората аммония, вершины которых поджигались спиралью накаливания. Такой способ позволял получить надежное и одновременное поджигание всей поверхности образца.

Эксперименты проводили на следующих установках:

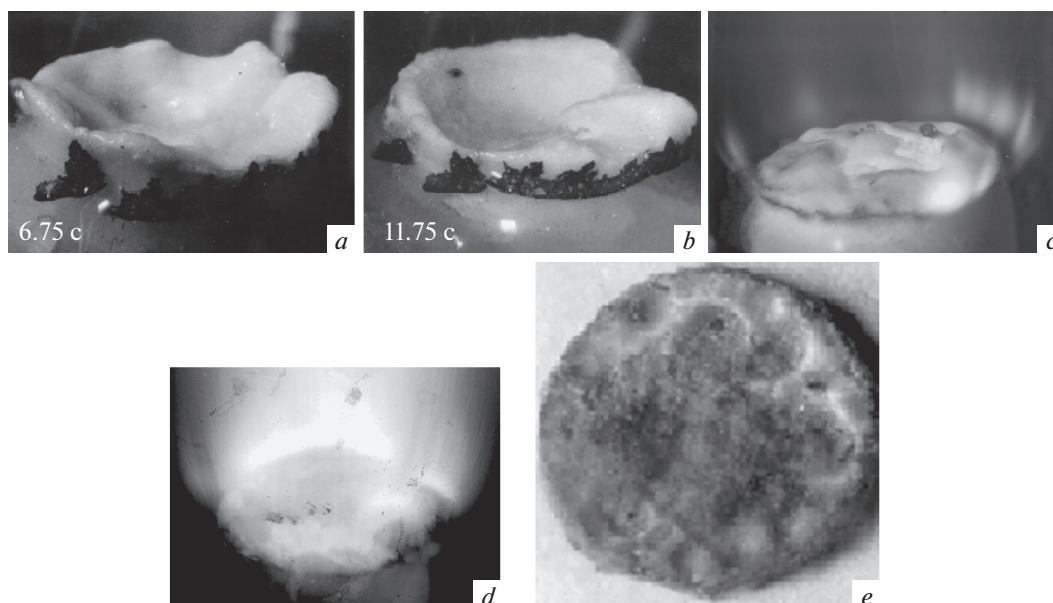
– стеклянный цилиндр диаметром 95 мм и высотой 160 мм с атмосферой азота, которая создавалась продувкой цилиндра азотом из баллона в течение нескольких минут;

– сосуд постоянного объема в  $1.5 \cdot 10^3$  см<sup>3</sup>, заполняемый азотом из баллона до заданного давления (1–50 атм) или создания вакуума до 0.5 атм;

– установка бомба-ресивер с вышибной мембраной, которая позволяла получать сбросы давления с заданными начальным, конечным давлениями и скоростью спада для гашения образцов;

– бомба постоянного объема с системой впрыска воды (или другого охладителя) на поверхность горящего образца для его гашения.

Давление регистрировалось с помощью манометра или датчика давления ДД-10 с индуктивным индикатором давления ИД-2И в сочетании с осциллографом Н-700. Исследования структуры волны горения проводились путем многокадрового фотографирования образца в стеклянном



**Рис. 1.** Вид поверхности горения образцов НМХ, горевших в азоте при давлении 1 атм: *a, b* – образцы диаметром 10 мм в моменты времени 6.75 и 11.75 с от начала горения (фото сделаны с использованием фотовспышки); *c, d* – вид поверхности горения и зоны пламени таких же образцов в моменты времени 2 и 4 с (киносъемка в собственном свете); *e* – след волны горения на подложке из пластилина.

цилиндре, которое проводилось в собственном свете и с применением нескольких фотовспышек.

#### *Вид поверхности горения октогена*

На рис. 1 представлены кадры, изображающие поверхность горения образцов НМХ в атмосфере азота при давлении  $P = 1$  атм. Аналогичный вид поверхностей горения образцов диаметром 10 мм, которые горели в бомбе постоянного объема ( $1500 \text{ см}^3$ ) в атмосфере азота при давлениях 1–50 атм и гасились впрыском воды, представлен на рис. 2.

Анализ представленного вида поверхностей горения показывает, что она неоднородная, неплоская вследствие очагового механизма горения. Это предполагает [13–15], что горение осуществляется за счет локальных очагов, которые формируются поперечными волнами и создают ячеистую структуру. Фронт поперечной волны представляет собой пологую ступеньку, которая переменна как вдоль поверхности образца, так и в глубь его.

Средняя скорость поперечной волны в несколько раз превышает нормальную скорость сгорания образца в целом, имеет широкий разброс локальных значений на фронте волны и возрастает с ростом давления. После прохождения фронта возможно прекращение горения до прихода очередной поперечной волны [16–18].

Отметим, что анализ очагового горения октогена затруднен по сравнению с ранее исследованными баллиститными порохами и пироксилином по следующим причинам.

1. На поверхности горения октогена имеется довольно толстый жидко-вязкий слой и поверхность выглядит как оплавленная (рис. 1*a, b*) – при температуре плавления  $280^\circ\text{C}$  температура поверхности при давлениях от 1 до 50 атм изменяется от  $320$  до  $500^\circ\text{C}$  [3].

2. При горении баллиститов на фронте горения образуются углеродистые чешуйки, которые на поверхности образца очерчивают контуры очага [16–18]. При горении октогена углеродистые частицы, по-видимому, разлагаются и сгорают приблизительно в 2 раза быстрее по сравнению с баллиститными порохами из-за более высокой (примерно в 2 раза) температуры пламени и близости его к поверхности. В табл. 1 для сравнения приведены данные для баллиститных порохов Н, НБ и октогена при 5 атм [3, 19].

3. На рис. 1, 2 оценка размеров очагов затруднена, так как они находятся на разных стадиях развития, когда в процессе горения размер изменяется от минимального до максимального – характерного размера  $L$ . По отдельным кадрам можно рассчитать средний по площади диаметр очага, *d*.

Опишем поверхности горения, представленные на рис. 1 и 2 при разных давлениях.

На рис. 1*a–d* представлены четыре кадра, изображающие поверхность образца диаметром 10 мм, горящего октогена в азоте при  $P = 1$  атм. Представленные фотографии с фотовспышкой (рис. 1*a* и *b*) изображают вид поверхности последовательного горения с интервалом в 5 с. Видно,

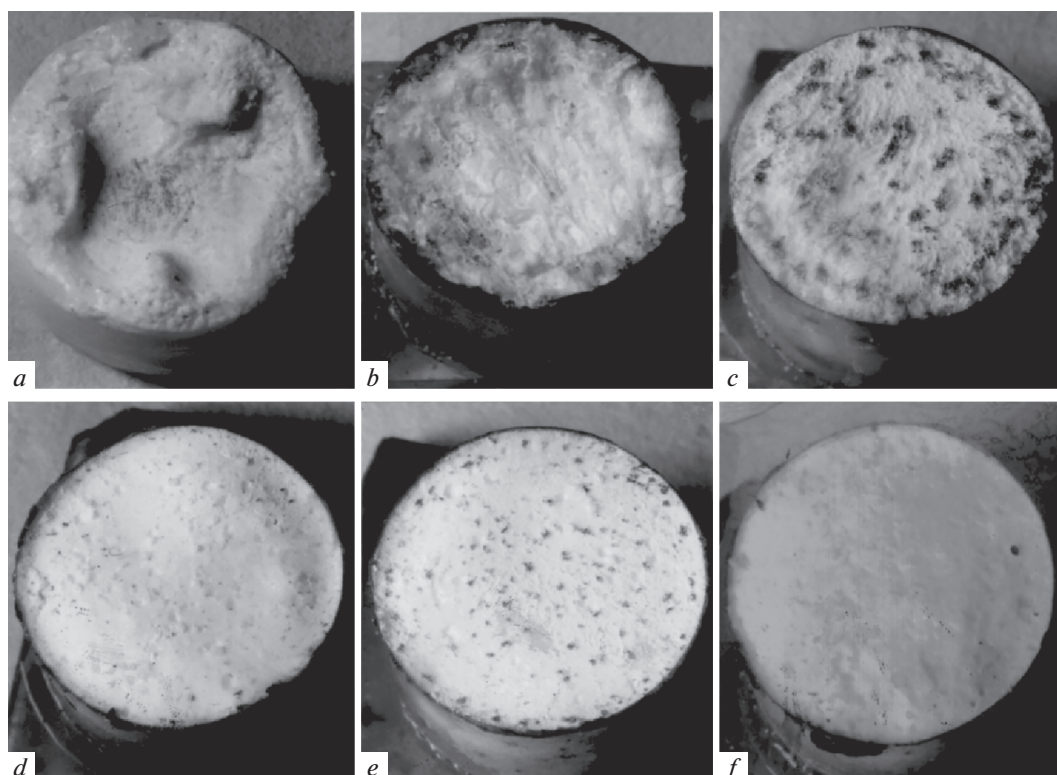


Рис. 2. Вид поверхностей горения погашенных образцов НМХ диаметром 10 мм, горевших в азоте при давлениях 1, 2, 5, 10, 20 и 50 атм – кадры *a–f* соответственно.

что на поверхности образца образуется углубление – очаг, отдельные участки которого выгорают неравномерно. Характерный размер очага  $L \sim 3–4$  мм, а глубина  $h$  может достигать величины  $\sim 2$  мм. О наличии поперечных волн свидетельствуют светящиеся продукты распада, оттекающие с фронтов горения на кадре рис. 1с. Очаги могут быть не так явно выражены (см. рис. 1с и *d*), но, обычно, они формируются так: один – в центре, остальные прилегают к боковой поверхности образца. О том, что это отдельный очаг, говорит более светлое свечение в виде купола над ним (рис. 1*d* – кадр видеофильма). Ярко светящийся купол – тонкая зона максимальной температуры продуктов сгорания, которая находится на высоте примерно 0.3 мм над поверхностью горения очага и имеет видимую толщину около 0.5 мм. На образце диаметром 10 мм иногда насчитывается до 6–7 горящих очагов. Они более отчетливо видны по следу волны горения на подложке из пластилина (рис. 1*e*). Вид поверхностей горения при повышенных давлениях был получен в опытах с бомбой постоянного объема при гашении образцов впрыском воды (рис. 2) или критическим спадом давления.

Анализ поверхностей горения погашенных образцов показал следующее:

– при давлении 1 атм (рис. 2*a*) получен тот же результат, что приведен выше: на поверхности го-

рения образуются очаги с характерным размером очага  $L \sim 3–4$  мм при глубине  $h$  до 2.5 мм;

– при давлении 2 атм (рис. 2*b*) большинство очагов имеют характерный размер  $L$  около 2 мм и глубину до 1.5 мм. На фотографии самый большой очаг – в виде эллипса с большой осью около 3 мм и малой осью около 1.5 мм;

– при давлении 5 атм (рис. 2*c*) получен вид погашенной поверхности из серии опытов со сбросом давления с начального уровня в 40 атм до конечного в 4–7 атм и характерным временем спада 12.7–7.5 мс. На представленном рисунке поверхность покрыта мелкими “углублениями” – очагами с  $L = 4.0, 0.7$  и 2.2 мм и глубиной  $h$  до 0.5 мм; отдельные ее участки слегка приподняты или

Таблица 1. Средняя скорость горения  $U$ , температура поверхности горения  $T_s$ , температура пламени  $T_A$  и расстояние от поверхности горения до сечения,  $l_A$ , где температура равна  $0.9T_A$  [3] для баллистных порохов Н, НБ и октогена

Вещество	$P$ , атм	$U$ , мм/с	$T_s$ , °C	$T_A$ , °C	$l_A$ , мм
Н	5	1.5	260	1000	0.24
НБ	5	2.2	320	1150	0.35
Октоген	5	1.6	380	2300	0.15

Таблица 2. Зависимость от давления  $P$  средней по образцу скорости горения октогена  $U$ , характерных,  $L$ , и минимальных  $L_{min}$ , размеров очагов, среднего по площади диаметра  $d$ , их глубины  $h$  и толщины  $\delta$  теплового слоя в к-фазе

$P$ , атм	$L$ , мм	$d$ , мм	$L_{min}$ , мм	$h$ , мм	$\delta$ , мкм	$U$ , мм/с
0.75	7	—	2	4.5	0.34	0.3
1	4	—	3	2.5	0.25	0.375
2	3	—	2	1.5	0.15	0.66
5	2.8	—	1.5	0.7	0.07	1.4
10	—	1.4	0.7	0.4	0.04	2.4
20	—	0.7	—	0.2	0.024	4.2
50	—	0.6	0.5	0.1	0.01	8.8

опущены так, что на отрезке в 4–5 мм перепад высот составляет около 0.7 мм. В другом опыте, например, на холмистой поверхности достаточно хорошо просматриваются семь очагов с размерами ( $L/h$  – характерный диаметр/глубина в мм): 2.7/0.4, 4.1/0.7, 2.3/0.2, 5.0/0.3, 2.0/0.2, 1.7/0.05, 1.6/0.07, что дает средний размер очага, равный 2.8 мм; вместе с тем в аналогичном опыте наблюдались шесть очагов с размерами 0.5–1.5 мм и глубиной до 0.5 мм;

– при давлении 10 атм (рис. 2*d*) поверхность горения выглядит как система сглаженных пологих холмов с расстоянием между ближайшими вершинами примерно в 4–6 мм, а глубина впадин между вершинами – до 0.3–0.4 мм, причем на участках поверхности можно выделить отдельные

очаги со средним по площади диаметром  $d$  как в 1.44 мм, так и в 0.66 мм;

– при давлении 20 и 50 атм (рис. 2*e* и *f*) картина в целом такая же, как при 10 атм, но глубина несколько меньше: 0.2–0.1 мм. Кроме того, на рис. 2*e* при 20 атм на половине поверхности горения образца можно выделить 107 очагов примерно одного размера, что дает средний по площади диаметр очага  $d \approx 0.7$  мм. При давлении 50 атм (рис. 2*f*) примерно на четверти поверхности образца насчитывается  $\sim 67$  очагов, что дает средний по площади диаметр очага  $d \approx 0.5$ –0.6 мм.

Отметим, что при давлении 10–50 атм по всей поверхности горения как бы рассеяны небольшие сглаженные углубления и выпуклости, которые наблюдались на образцах, полученных как при гашении впрыском воды, так и при гашении сбросом давления. Их размер составляет 0.15–0.45 мм. Глубина впадин – 0.05 мм, а высота выпуклостей – до 0.1 мм. Как впадины, так и выпуклости чаще выглядят гладкими “оплавленными”, хотя среди них встречаются и такие, дно которых покрыто кристалликами, похожими на снежинки. Данные этих исследований представлены в табл. 2 и на рис. 3. Первая зависимость ( $L_1$ ) получена для диапазона давлений от 0.75 до 50 атм, а вторая ( $L_2$ ) – для диапазона от 1 до 50 атм и представляется более реальной, так как при  $P = 0.75$  атм разброс размеров очагов изменяется в пределах от 2 до 7 мм и характерный размер хуже определен.

### Скорость горения октогена

Средняя скорость горения октогена определялась на прессованных образцах диаметром 10 мм и высотой 15 мм, боковая поверхность которых бронировалась клеем БФ-2. Начало и конец горения образца регистрировались по изменению давления в бомбе. Эксперименты проводили в атмосфере азота при давлениях от 2 до 50 атм. Результаты экспериментов представлены на рис. 4. Эти данные хорошо совпадают с данными работ [6–11], хотя в работах [1–3] измерения проводились на небольших базах в 2–5 мм, но результаты усреднялись по большому количеству опытов.

### Обсуждение результатов

Авторы предшествующих работ [1–12] не ставили перед собой задачу исследования неоднородности фронта и считали поверхность горения и зону пламени одномерными. Хотя в работе [6] приводятся фотографии вида пламени октогена с отдельными высокотемпературными зонами повышенной светимости над горящим образцом и отмечается, что при давлениях выше 3 атм горение октогена нестабильно. В работе [1] при исследовании горения октогена с помощью термопарного метода получены параметры волны горения

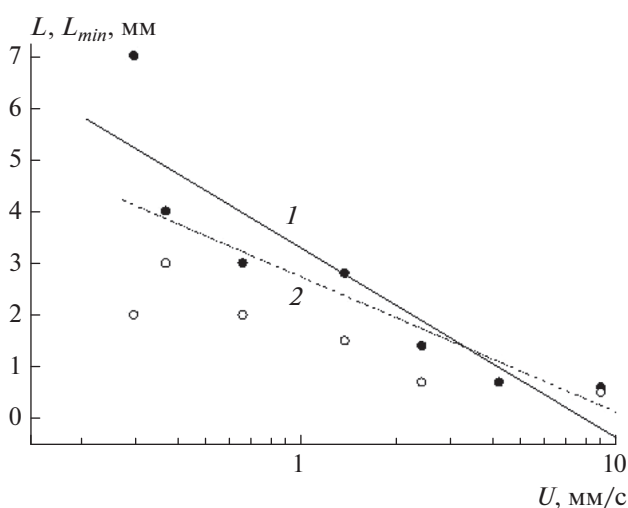


Рис. 3. Зависимость размера очага от средней скорости горения: ● – характерный размер очага  $L$ , ○ – минимальный размер очага  $L_{min}$ , 1 –  $L_1 = 3.3U^{-3.7}$ , 2 –  $L_2 = 2.7U^{-2.6}$ .

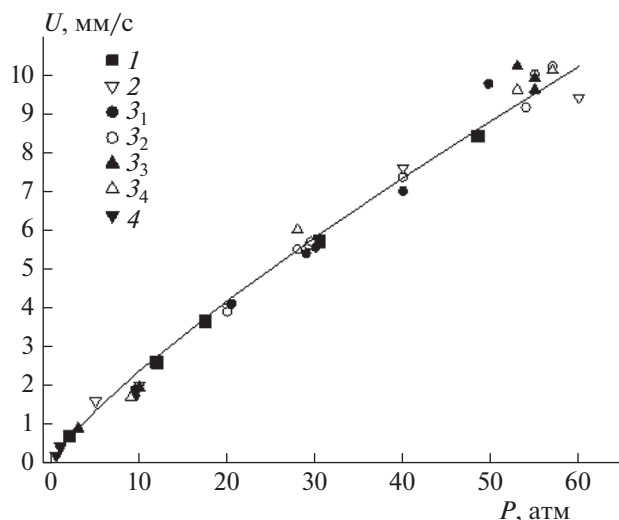


Рис. 4. Зависимость скорости горения от давления при начальной температуре 20°C: 1 – наши данные; 2 – данные из работ [1–3]; 3 – образцы с разной дисперсностью порошка: 3<sub>1</sub> – полидисперсный, 3<sub>2</sub> – 100–200 мкм, 3<sub>3</sub> – <50 мкм, 3<sub>4</sub> – 1–10 мкм [4]; и 4 – данные из [5]. Линия – зависимость  $U$  [мм/с] =  $= 0.37P^{0.81}$  [атм].

при давлении в диапазоне 0.5–500 атм по усредненным, сглаженным профилям температур без указания разброса данных и не обсуждается вопрос о неоднородности фронта волны горения. Указывается только, что горение октогена нестабильно при давлениях ниже 0.5 атм, когда исследуемые образцы самопроизвольно гаснут после поджига. В работе [12] отмечается, что “горение октогена в самоподдерживающемся режиме имеет автоколебательный характер. Интервалы, длительностью 1–3 с, регулярных колебаний (4.5–6 Гц) реактивной силы со значением в минимуме, близким к нулю, перемежаются участками колебаний с уменьшающейся амплитудой”. Причина – прорыв пузырьков с продуктами полураспада через слой расплава в к-фазе. В работе [11] также обнаруживали колебательный режим горения при атмосферном давлении. Считают, что он “обусловлен, с одной стороны, возникновением резонансных явлений при горении неоднородной газовой смеси в трубке, а с другой стороны, связан с несоответствием между скоростью химической реакции в газовой фазе в момент резонанса и ее энергетическими возможностями, не позволяющими задать нужную скорость газификации”.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты исследования показывают, что неоднородный фронт горения октогена в диапазоне давлений 0.5–50 атм, является следствием очагового механизма горения, анало-

гичного механизму горения нитроглицериновых порохов, нитроклетчатки и перхлората аммония [13–23]. При этом надо заметить, что он менее четко выражен из-за наличия расплавленного слоя на поверхности к-фазы, более высокой температуры пламени (почти в 2 раза) и хуже регистрируется, так как при горении не образуется углеродистый каркас, который у баллиститов очерчивает контуры очагов. Эти особенности и наличие бронировки образцов не позволили на данном этапе зафиксировать поперечные волны, которые формируют очаги [18]. Модель образования очагов на основе анализа устойчивости приповерхностного слоя в к-фазе предложена в работе [24]. Таким образом, в настоящей работе продолжено развитие фундаментальных исследований по механизму горения индивидуальных ВВ, задачей которого является исследование неоднородной структуры волны горения, связанной с неустойчивостью фронта горения.

Авторы выражают благодарность Г.В. Мелик-Гайказову и В.М. Пучкову за участие в работе.

Работа выполнена в рамках госзаданий № АААА-А17-117040610346-5 и № АААА-А17-117021310385-6 и частично финансировалась за счет средств гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-08-01454а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zenin A.A. // J. Propul. Power. 1995. V. 11. № 4. P. 752.
2. Zenin A.A., Finjakov S.V. // Prog. 37th Intern. Annu. Conf. of ICT. Karlsruhe, FRG, 2006. Paper 118. P. 1.
3. Зенин Ф.Ф., Пучков В.М., Финяков С.В. // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34. № 2. С. 59.
4. Glazkova A.P., Aphanasyev G.T., Postnov S.I. // Proc. 17th Intern. Pyrotechnics Seminar Combined with the 2nd Beijing Intern. Sympos. on Pyrotechnics and Explosive. V. 1. Beijing, China, 1991. P. 636.
5. Коробейничев О.П., Куйбида Л.В., Мадирбаев В.Ж. // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20. № 3. С. 43.
6. Kubota N. // Nonsteady Burning and Combustion Stability of Solid Propellants edited by Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA. Washington D.C., 1992. P. 233.
7. Price C.F., Boggs T.L., Derr R.L. // AIAA Paper 79-0164. 1979. P. 1.
8. Atwood A.L., Boggs T.L., Curran P.O., Hanson-Parr D.M. // J. Propul. Power. 1999. V. 15. № 6. P. 740.
9. Harrach R.I. // J. Appl. Phys. 1976. № 6. P. 24.
10. Щемелин Ю.А., Умблиа С.Б. // Вопросы воспламенения и горения ракетных топлив. Томск: ТГУ, 1983. С. 105.
11. Синдицкий В.П., Егоршев М.В., Березин М.В. // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 5. № 4. С. 128.
12. Симоненко В.Н., Кискин А.Б., Зарко В.Е., Свит А.Г. // Там же. 1997. Т. 33. № 6. С. 68.
13. Синаев К.И. // Тез докл. I Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Черноголовка, 1968. С. 59.

14. *Маршаков В.Н.* // Хим. физика. 1987. Т. 6. № 4. С. 530. <https://doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2019027692>
15. *Ананьев А.В., Истратов А.Г., Курсанова З.В. и др.* // Хим. физика. 2001. Т. 20. № 12. С. 47.
16. *Маршаков В.Н., Истратов А.Г., Пучков В.М.* // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39. № 4. С. 100.
17. *Истратов А.Г., Маршаков В.Н.* // Хим. физика. 2006. Т. 25. № 5. С. 37.
18. *Маршаков В.Н., Финяков С.В.* // Хим. физика. 2017. Т. 36 № 6. С. 24.
19. *Krupkin V.G, Marshakov V.N., Rashkovskiy S.A.* // Intern. J. Energetic Mater. and Chem. Propul. 2019. V. 18. № 4. P. 287;
20. *Rashkovskiy S., Krupkin V., Marshakov V.* // Combust. and Flame. 2019. V. 208. P. 45.
21. *Rashkovskiy S.A., Krupkin V.G., Marshakov V.N.* // J. Physics: Conf. Series. 2019. V. 1250; <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1250/1/012041>
22. *Маршаков В.Н., Колесников-Свинарев В.И., Финяков С.В.* // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 2. С. 30.
23. *Маршаков В.Н., Мелик-Гайказов Г.В.* // Хим. физика. 2009. Т. 28. № 12. С. 45.
24. *Крупкин В.Г., Мохин Г.Н.* // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 8. С. 24; <https://doi.org/10.1134/S0207401X1908007>