

Показано, что влияние инертных добавок (вода и углекислый аммоний) на скорость горения гексогена и тетрила при 50 *ати* может быть объяснено в рамках теории Я. Б. Зельдовича в предположении постоянства температуры реакционного слоя конденсированной фазы. В случае пироксилина (20 *ати*) температура поверхности при введении добавок, по-видимому, снижается.

2. В случае смесей гексогена с 10—20% воды обнаружена сильная турбулизация горения, приводящая к значительному увеличению скорости. (При 150 *ати* смесь гексогена с 20% воды горела со скоростью до 1 *м/сек.*) Горение сопровождается сильной пульсацией, выбросом части вещества из трубки и затухает при давлениях до 30—50 *ати* для 10%-ной смеси и при 50—100 *ати* — для 20%-ной. Введение в смесь 3% натрийкарбоксиметилцеллюлозы стабилизирует горение и снижает его скорость.

3. Добавление к аммониту № 6ЖВ углекислого аммония и воды привело к примерно такому же падению скорости (200 *ати*), как в случае гексогена и тетрила. Введение фторида аммония повлияло на скорость сильнее. Можно думать, что и в этом случае механизм влияния добавок в основном тепловой. Оксалат, фосфат, сульфат и хлорид аммония снижали скорость горения амматола слабее, чем карбонат.

4. Помимо теплопоглощающих добавок имеются вещества, для которых можно ожидать химического взаимодействия с ВВ или с продуктами его превращения. Сильное ингибирующее действие на горение амматола оказали меламина и дифениламин, несколько более слабое — циануровая кислота. Можно предположить, что эти вещества связывают двуокись азота, являющуюся, по-видимому, основным окислителем в рассматриваемой системе.

Поступила в редакцию
22/VI 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Андреев. Сб. «Теория ВВ». М., Оборонгиз, 1963, стр. 413.
2. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение ВВ. М., «Наука», 1966.
3. P. Gray, J. C. Lee, D. C. Taylor. 6-th Symposium on Combustion, N. Y., 1957, 255.
4. Н. Мигаот, Bull. Soc. Chim, 1931, 49, 268.
5. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1942, 12, 11—12.
6. А. Д. Марголин, А. Е. Фогельзанг. ФГВ, 1966, 2.
7. Э. И. Максимов. Канд. дисс., ФИХФ АН СССР, 1965.
8. К. К. Андреев, П. П. Попова. Докл. АН СССР, 1960, 134, 1142.
9. А. П. Глазкова, П. П. Попова. Докл. АН СССР, 1967, 177, 6, 1341.
10. Б. Н. Кондриков, В. П. Лушкин. Инф. вып. № В-158 Института горного дела им. А. А. Скочинского. М., 1965 стр. 6.
11. К. К. Андреев, А. П. Глазкова. Докл. АН СССР, 1952, 86, 4, 801; Сб. Теория ВВ, М., «Высшая школа», 1967, стр. 321.

УДК 662.215.1

О ГОРЕНИИ БЫСТРОГОРЯЩИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Б. С. Светлов, А. Е. Фогельзанг
(Москва)

Обширные экспериментальные исследования вторичных ВВ и порохов позволили не только объяснить многие закономерности их горения, но и сформулировать основы теории стационарного процесса. В то же

время горение взрывчатых веществ, относящихся к инициирующим и быстрогорящим, изучалось сравнительно мало. До сравнительно недавнего времени вообще не было ясно, способны ли они в чистом виде к устойчивому горению или при наличии достаточно длинного заряда горение их обязательно переходит в детонацию. Лишь гремучая ртуть и пикрат калия [1—4] изучены более или менее подробно, причем данные по пикрату калия носят противоречивый характер. Предложенные механизмы горения быстрогорящих ВВ [1, 2, 5—7] имеют чисто гипотетический характер, что связано прежде всего с отсутствием достаточного экспериментального материала, а также, видимо, с большой сложностью и необычностью процессов, протекающих при их горении.

Поскольку развитие теоретических представлений неразрывно связано с накоплением фактического материала, то для выяснения особенностей и механизма горения инициирующих и быстрогорящих ВВ необходимо было прежде всего систематически изучить указанные ВВ, определив возможность устойчивого горения и одну из основных характеристик горения — зависимость его скорости от давления.

Иницирующими и быстрогорящими ВВ являются вещества, содержащие в молекуле атом металла (гремучая ртуть, азид свинца, стифнат свинца и т. п.), или группу атомов, обладающую, как принято считать, малой устойчивостью (диазодинитрофенол, тринитротриазидобензол, циануртриазид и т. п.). В работе изучались наиболее простые — соли взрывчатых кислот, таких, как пикриновая и стифниновая, а также соли, обладающие значительно меньшей теплотой взрывчатого превращения: ди- и мононитрофеноляты, мононитрорезорцинаты и в том числе соли орто- и паранитрофенолов.

Опыты проводились в бомбе постоянного давления с окнами. Давление создавалось техническим азотом, характер и скорость горения образца фиксировали с помощью барабанного фоторегистра. Точность измерения времени горения составляла $\pm 5\%$. Заряды готовились из тонкодисперсных порошков (размер частиц порядка 0,01 мм) глухим прессованием при давлении 4000—7000 кг/см² непосредственно в полированную трубку из оргстекла. Были использованы трубки с внутренним диаметром 7; 4,8 и 4 мм, толщиной стекла 1; 2,5; 2 мм и высотой 35, 25, 20 мм соответственно. Высота готовых зарядов не превышала 1,5—2 диаметров. Относительная плотность составляла 0,85—0,95.

ГОРЕНИЕ СОЛЕЙ ПИКРИНОВОЙ КИСЛОТЫ

Пикраты одновалентных металлов. Были изучены пикраты лития, натрия, калия, рубидия, цезия и серебра. Опыты проводили в трубках диаметром 7 мм.

Зависимости скорости горения от давления представлены на рис. 1. Все кривые $u(p)$ имеют максимум и минимум, которые, как видно из табл. 1, наблюдаются при различных давлениях. После минимума скорость горения растет по прямой $u = A + Bp$.

Коэффициент B близок по величине к соответствующему коэффициенту для вторичных ВВ.

Наблюдается очень резкое увеличение скорости горения с давлением у рассматриваемых пикратов перед достижением максимума. Так, для пикрата калия увеличение давления от 1 до 7 кг/см² приводит к возрастанию скорости горения почти в 20 раз, для пикрата рубидия и цезия при изменении давления от 1 до 5 кг/см² — в 10 раз.

Пикраты калия, рубидия и цезия горят при атмосферном давлении, образуя много черного дыма; скорости горения примерно одинаковы и равны 0,3—0,4 см/сек. Горение сопровождается свистом; в пламени видны раскаленные частицы. Пикраты лития, натрия и серебра не горят в этих условиях, а при поджигании дают интенсивную вспышку, сопровождающуюся разбросом вещества. Пикрат натрия начинает гореть при 4 кг/см² со скоростью 0,9 см/сек, а пикраты лития и серебра — при 6 кг/см² со скоростями 0,7 и 2,8 см/сек соответственно.

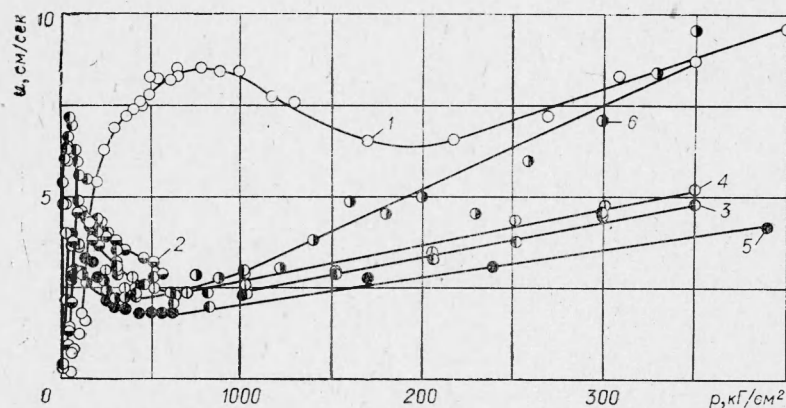


Рис. 1. Зависимость скорости горения пикратов одновалентных металлов от давления.

Пикраты: 1 — лития; 2 — натрия; 3 — калия; 4 — рубидия; 5 — серебра; 6 — цезия.

После сгорания пикратов натрия, калия, рубидия и цезия на столике бомбы остается значительное количество конденсированных продуктов. До 20—30 кг/см² это — объемный черный остаток; при 50 кг/см² он почти исчезает, а на трубке и столике бомбы появляется тонкий белый налет. При 100—150 кг/см² образуются белые, как бы застывшие гранулы; при 350—400 кг/см² вся трубка оказывается покрыта ими; черного остатка совсем нет. Пикрат лития при всех давлениях горит без копоти и сажи, образуя белый дым.

Пикраты двухвалентных металлов. В этой работе изучались пикраты бериллия и бария в трубках диаметром 7 мм. Горение пикратов магния, цинка и свинца описано в [8]. Зависимость $u(p)$ представлена на рис. 2. Пикраты бериллия и бария, так же как и пикраты одновалентных

Таблица 1

Вещество	Максимум $u(p)$		Минимум $u(p)$		Скорость горения после минимума
	$p, \text{кг/см}^2$	$u, \text{см/сек}$	$p, \text{кг/см}^2$	$p, \text{см/сек}$	
Пикрат лития . .	80—90	8,5	200	6,5	$u=2,8+0,017p$
натрия . .	10—12	4,5	—	—	—
калия . .	7—8	7,2	70	2,0—2,3	$u=1+0,013p$
рубидия . .	4	4,0	70	2,4	$u=1+0,013p$
цезия . .	5—7	3,0	30—45	2,3	$u=0,3+0,025p$
серебра . .	7—8	3,8	50—60	1,8	$u=1,3+0,008p$

металлов, имеют максимум и минимум на кривой $u(p)$ (табл. 2); после минимума скорость горения также растет по прямой.

Из изученных пикратов двухвалентных металлов только пикраты ртути и магния [8] способны гореть при атмосферном давлении, причем

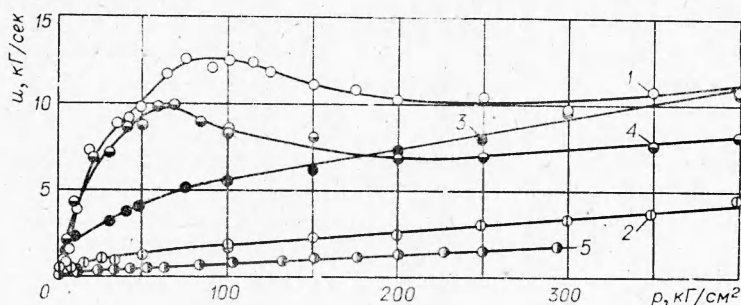


Рис. 2. Зависимость скорости горения пикратов двухвалентных металлов от давления.

Пикраты: 1 — бериллия; 2 — магния [8], 3 — цинка [8], 4 — бария, 5 — ртути [8].

Таблица 2

Вещество	Максимум $u(p)$		Минимум $u(p)$		Зависимость после минимума
	$p, \text{кг/см}^2$	$u, \text{см/сек}$	$p, \text{кг/см}^2$	$u, \text{см/сек}$	
Пикрат бериллия	100	12,5	250	10	—
бария	70	10	200	7	$u=5+0,01p$

пикрат ртути горит со скоростью $0,042 \text{ см/сек}$ со слабым свечением, без копоти, выделяя белый дым, а пикрат магния — со скоростью $0,4—0,5 \text{ см/сек}$, выделяя много черного дыма. Пикраты бериллия, бария и цинка начинают гореть при $3—5 \text{ кг/см}^2$ с $u=0,75—0,85 \text{ см/сек}$, а пикрат свинца — при 18 кг/см^2 со скоростью около 2 м/сек .

ГОРЕНИЕ 2,4-ДИНИТРОФЕНОЛЯТОВ ЛИТИЯ, КАЛИЯ И СВИНЦА

Из изученных солей динитрофенола только калиевая способна гореть при атмосферном давлении (со скоростью $0,7 \text{ см/сек}$). Динитрофенолят лития (ДНФ — Li) горит при 2 кг/см^2 , а динитрофенолят свинца (ДНФ — Pb) при $3,7 \text{ кг/см}^2$ со скоростями $0,29$ и $1,1—1,5 \text{ см/сек}$ соответственно [8] (рис. 3).

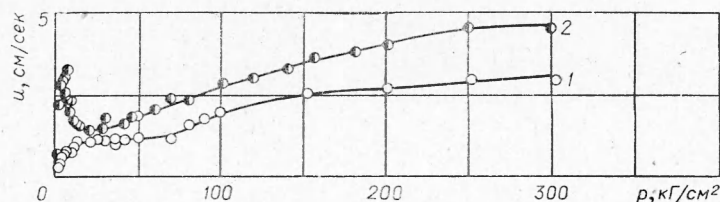


Рис. 3. Зависимость скорости горения 2,4-динитрофенолятов лития (1) [8] и калия (2) от давления.

Динитрофенолят калия (ДНФ — К), так же как и пикрат калия, имеет максимум скорости горения (2,9 см/сек) при 4—5 кг/см², и минимум (1,4 см/сек) при 20 кг/см². После минимума скорость горения увеличивается по закону: $u = 0,19p^{0,57}$.

После сгорания зарядов ДНФ — Li и ДНФ — К образуются крупные куски черной сажи, а при давлениях выше 100 кг/см² вся трубка оказывается заполненной ею. При горении же ДНФ — Рb образуется серая пыль. Горение ДНФ — Li и ДНФ — Рb подробно описано в [8].

ГОРЕНИЕ СВИНЦОВОЙ И КАЛИЕВОЙ СОЛЕЙ ОРТО- И ПАРАНИТРОФЕНОЛОВ

Опыты проводились с солями, запрессованными в трубки диаметром 4,8 мм.

Зависимость скорости горения *о*-нитрофенолята калия от давления представлена на рис. 4, а. Он горит при атмосферном давлении со скоростью 0,28—0,34 см/сек. Повышение давления до 1,3—1,5 кг/см² приводит к увеличению скорости горения до 0,4 см/сек (максимум на кривой $u(p)$), после чего она начинает падать и при 4,6 кг/см² достигает своего минимального значения 0,24 см/сек. Дальнейший рост скорости горения до 76 кг/см² происходит по прямой $u = 0,23 + 0,0065p$. Паранитрофенолят калия не горит при атмосферном давлении. При попытке поджечь его при 60 кг/см² он прогорал на 1—1,5 мм и затухал.

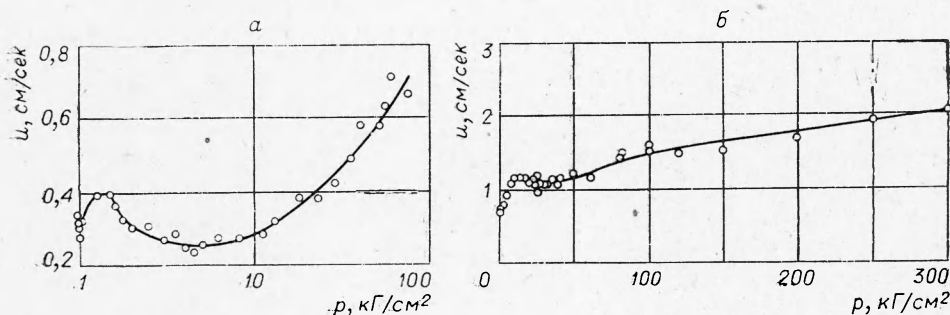


Рис. 4. Зависимость скорости горения солей ортонитрофенола от давления. а — ортонитрофенолят калия; б — ортонитрофенолят свинца.

Ортонитрофенолят свинца горит при атмосферном давлении со скоростью 0,7 см/сек (рис. 4, б). Повышение давления до 10 кг/см² приводит к росту скорости горения по прямой $u = 0,65 + 0,48p$. В интервале давлений 10—40 кг/см² скорость горения не изменяется и остается равной 1,1 см/сек. Дальнейшее повышение давления приводит к новому росту скорости горения; при 300 кг/см² она становится равной 2,1 см/сек. Паранитрофенолят свинца при атмосферном давлении горит со скоростью 0,14—0,18 см/сек, т. е. почти в четыре раза медленнее ортонитрофенолята свинца. Увеличение диаметра заряда до 7 мм не изменяет скорости горения. Определить зависимость $u(p)$ паранитрофенолята свинца не удалось; слишком слабое свечение при горении не позволяет получить отчетливых фотографий.

Горение солей нитрофенола протекает с выделением серого дыма. Из трубки вылетают крупные куски сажи, а после сгорания заряда она вся оказывается заполненной конденсированными продуктами горения.

ГОРЕНИЕ КИСЛОГО 2-НИТРОРЕЗОРЦИНАТА КАЛИЯ

Кислый 2-нитрорезорцинат калия изучали в трубках диаметром 4,8 мм. Он горит при атмосферном давлении со скоростью 0,34—0,40 см/сек. Зависимость скорости его горения от давления имеет две области насыщения (рис. 5). Повышение давления до 60 кг/см² приводит к увеличению скорости горения по закону $u = 0,39p^{0,38}$. При 60 кг/см² происходит изменение закона роста скорости горения.

После сгорания заряда образуется много конденсированных продуктов горения. При атмосферном давлении образуются крупные куски сажи, а при повышенных — сплошной твердый стержень. Детальное изучение горения солей стифниновой кислоты (средний и кислый стифнаты калия, стифнат свинца, пикрат железа), азид бария, а также калиевой соли тринитробензойной кислоты проведено в [8].

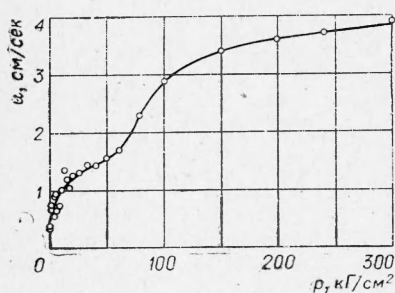


Рис. 5. Зависимость скорости горения кислого 2-нитрорезорцината калия от давления.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

У исследованных быстрогорящих ВВ скорость горения с ростом давления растет, падает или остается постоянной в широком диапазоне последнего. В соответствии с таким разнообразием все рассмотренные здесь и в [8] вещества можно разделить на пять групп.

К первой группе относятся пикраты магния, цинка, ртути, средний стифнат калия и азид бария, имеющие распространенную зависимость скорости горения от давления $u = A + Bp^x$.

Вторая группа объединяет пикраты двух- и трехвалентного железа, динитрофенолят лития, *o*-нитрофенолят свинца, кислый 2-нитрорезорцинат калия и тринитробензоат калия. Зависимость скорости их горения от давления имеет площадку на кривой $u(p)$.

Скорость горения веществ третьей группы: пикрата и динитрофенолята свинца, кислого стифната калия и тринитрорезорцината свинца (ТНРС) в широком диапазоне давления остается постоянной.

Характерной особенностью веществ четвертой и пятой групп является наличие максимума и минимума на кривой $u(p)$. Для веществ четвертой группы — пикратов калия, натрия, серебра, рубидия, цезия, динитрофенолята и *o*-нитрофенолята калия — максимум расположен при сравнительно низком (1,5—10 кг/см²) давлении, тогда как у веществ, входящих в пятую группу, — пикратов лития, бериллия и бария — при высоком (70—100 кг/см²) давлении.

Интересной особенностью рассмотренных быстрогорящих ВВ является то, что близкие по химическому строению соли горят со скоростями (см/сек), различающимися в десятки и сотни раз (табл. 3). Так, при атмосферном давлении пикрат ртути горит почти в 700 раз медленнее тринитрорезорцината свинца и в десять раз медленнее пикрата и *o*-нитрофенолята калия. Все изучавшиеся соли (даже соли моонитросоединений) горят быстрее пикриновой кислоты. Наибольшую скорость горения имеют стифнат и пикрат свинца, а если рассмотреть соли одной

Таблица 3

Взрывчатое вещество		1	25	50	100	200	300	400
Пикрит	свинца	Не горит	10	21	26,5	30	30	30
	бериллия	"	7,8	9,8	12,5	10,3	9,8	11
	бария	"	7,0	8,7	8,6	6,9	7,3	8,2
	лития	"	6,3	8,3	8,4	6,6	8,3	9,5
	калия	0,4	4,0	2,8	3,0	3,3	4,6	—
	натрия	Не горит	3,9	3,2	—	—	—	—
	цинка	"	3,1	4,0	5,5	7,3	8,8	10,8
	рубидия	0,35	3,0	2,5	2,6	3,5	4,8	—
	цезия	0,3	2,4	2,5	2,9	5,0	7,5	—
	серебра	Не горит	2,2	1,8	2,3	2,9	3,7	4,5
	магния	0,4	1,0	1,2	1,7	2,6	3,5	4,6
	железа 3	0,3	0,7	1,2	1,7	3,0	3,2	4,0
	железа 2	0,3	0,7	1,2	1,7	2,7	2,9	3,3
	ртути	0,04	0,27	0,4	0,7	1,3	1,9	—
Динитрофе- нолят	свинца	Не горит	10	13	14,5	16,5	16,5	—
	калия	0,7	1,4	1,8	2,8	4,0	4,5	—
	лития	Не горит	1,1	1,2	2,0	2,7	3,0	—
o-Нитрофе- нолят	свинца	0,7	1,2	1,2	1,6	1,7	2,1	—
	калия	0,3	0,4	0,6	—	—	—	—
Стифнат	свинца	27	32	33	34	34	34	34
	калия I	0,5	12,3	13	13,8	13,8	13,8	13,8
	калия II	Не горит	6,1	7,2	8,2	9,5	10,5	—
2-нитрорезорцинат калия I		0,4	1,3	1,5	2,9	3,6	3,9	—
Азид бария		Не горит	3,2	3,9	—	—	—	—
Тринитробензоат калия		1,0	1,4	1,9	3,7	6,0	—	—
Пикриновая кислота		Не горит	—	0,33	0,6	1,1	1,5	2,0
Стрифниновая кислота		Не горит	Не горит	Не горит	Не горит	1,1	1,8	2,7

кислоты (три-, ди-, мононитрофенола и тринитрорезорцина), то всегда с большей скоростью горят именно свинцовые соли.

В ряду пикратов с большими скоростями горят соли свинца и бериллия, тогда как пикраты магния и ртути имеют наименьшие скорости горения. Близкими к ним скоростями горения обладают пикраты железа и серебра.

Объяснить наблюдаемые различия в скоростях горения имеющейся разницей в кинетике термического разложения не удастся [9]. Однако большое разнообразие в скоростях горения можно объяснить, предположив, что скорость горения солей связана с каталитическим влиянием металла, введенного в молекулу, на скорость химических реакций, ведущих к горению. Эти реакции могут, естественно, и не быть лимитирующими при термическом разложении, особенно, если речь идет о вторичных реакциях — реакциях окисления, поставляющих основное тепло. Исходя

из этого, можно составить ряд, характеризующий активность металла как катализатора горения. Получающийся ряд не соответствует существующим представлениям об активности катализаторов, используемых для ускорения различных реакций, поскольку при горении катализатор находится в совершенно необычных условиях и участвует, по-видимому, в основном в реакциях окисления органических продуктов кислородсодержащими соединениями азота. В этом ряду свинец и бериллий занимают первое место, а магний и ртуть — последнее. По-видимому, именно слабым каталитическим влиянием ртути на процессы тепловыделения можно объяснить возможность стационарного горения фульмината ртути в отличие от некоторых других солей гремучей кислоты, детонирующих при поджигании [10].

Сопоставление скоростей горения солей орто- и паранитрофенолов (табл. 4) показывает, что не только сам катион, но также и положение его в молекуле оказывают существенное влияние на скорость горения. Теплоты образования солей [11] и плотности заряда практически одинаковы, а разница имеется только в строении молекулы.

Таблица 4

$p, \text{ кг/см}^2$	<i>o</i> -Нитрофено- лят калия	<i>n</i> -Нитрофено- лят калия	<i>o</i> -Нитрофено- лят свинца	<i>n</i> -Нитрофено- лят свинца
1	0,3	Не горит	0,7	0,2
60	0,7	Не горит	1,2	—

Определенный интерес представляет устойчивое горение азидов бария [8] с умеренной скоростью, являющегося солью азотистоводородной кислоты, многие из которых — типичные инициирующие ВВ, детонирующие сразу при поджигании. Объяснить различие в поведении азидов можно, если предположить, что для соединения типа азид свинца разложение происходит практически в одну стадию. Тепло выделяется быстро и детонация происходит сразу же ($\tau = 10^{-7}$ сек) после воспламенения [10]. В случае же азидов бария и азидов кальция, также способного к устойчивому горению [2], возможен многостадийный механизм разложения с образованием промежуточных соединений [15], вследствие чего процесс тепловыделения разбивается на ряд зон по высоте пламени.

Особое внимание привлекает падение скорости горения с ростом давления, что характерно для веществ четвертой и пятой групп. Впервые аналогичная зависимость была получена для хромомагниевого термита [12]. В последнее время падение скорости горения с давлением получено для ряда веществ [4, 13, 14]. Сделаны также попытки объяснить наблюдающиеся аномалии [16, 17].

Одной из особенностей всех изученных веществ, дающих экстремумы на кривой $u(p)$, является способность плавиться и ожигаться при температурах, близких к температуре вспышки [18]. Оплавление же может приводить к слипанию горящих частиц и формированию сплошного слоя с меньшей суммарной поверхностью горения.

Возможно также, что уменьшение скорости горения с ростом давления связано с ингибирующим действием некоторых соединений, образующихся при горении [20]. Если при повышении давления в продуктах превращения в пределах ведущей зоны появляются вещества, ингибирующие реакцию, уменьшение скорости горения становится объяснимым. Следует указать, что роль металла (или его соединений) при подавлении развития взрыва метано-воздушных смесей, а также смесей в двигателях

внутреннего сгорания связывают с ингибированием. С этим предположением можно сопоставить тот факт, что карбонат калия образуется в продуктах горения пикрата калия, по-видимому, преимущественно при высоких давлениях.

Образование сплошного расплавленного слоя и в этом случае может иметь существенное значение, так как в нем из-за большой подвижности частиц появляются более благоприятные условия для ингибирующего действия.

Еще одна из вероятных причин падения скорости горения с ростом давления может заключаться в том, что при горении происходит интенсивное растрескивание вещества в прогретом слое, в частности, под действием теплового удара. Частички вещества уносятся от конденсированной фазы, причем горение не проникает в появляющиеся микротрещины, так как мало давление. Повышение давления, с одной стороны, приводит к увеличению градиента температуры и интенсивности растрескивания, а с другой — способствует проникновению горения в образующиеся трещины — происходит рост скорости горения. В то же время действие диспергирования [19] равносильно уменьшению эффективной теплоты реакции в к-фазе, а также увеличению эффективной константы скорости реакции или температуропроводности. Если, начиная с некоторого давления, теплотопери за счет уноса непрореагировавшего вещества начнут преобладать над всеми остальными факторами, причем тепловой поток из газов не будет компенсировать тепло, которое уносится с диспергированными частицами, то скорость горения будет уменьшаться с давлением.

*Поступила в редакцию
22/VI 1968*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев, А. Е. Беляева. Докл. АН СССР, 1941, 33, 41.
2. К. К. Андреев. Медленное термическое разложение и горение ВВ. М., Госэнергоиздат, 1957.
3. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков. Сб. «Физика взрыва», № 1. 1952; 177—184.
4. А. Ф. Беляев, А. И. Кондрашков. Докл. АН СССР, 1960, 131, 364.
5. А. Ф. Беляев. ЖФХ, 1938, 12, 93; Сборник статей по теории ВВ. Под ред. К. К. Андреева и Ю. Б. Харитона. М., Оборонгиз, 1940.
6. H. Muraoui. Compt. Rend, 1932, 194, 280; Mem. Art. française, 1938, 595; Chim. et ind., 1942, 48, 258.
7. А. Ф. Беляев. Сб. «Физика взрыва», № 1. 1952, 185.
8. Б. С. Светлов, А. Е. Фогельзанг. Теория ВВ. Сборник статей под редакцией К. К. Андреева. Изд-во «Высшая школа», М., 1967.
9. К. К. Андреев, Лю Бао-фен. Сб. «Теория взрывчатых веществ». М., Оборонгиз, 1963, 349—401.
10. Ф. Боуден, А. Иоффе. Быстрые реакции в твердых веществах. М., ИЛ, 1962.
11. К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1960.
12. А. Ф. Беляев, А. Д. Комкова. ЖФХ, 1950, 24, 11, 1302.
13. R. Friedman et al. VI Symposium on Combustion. 1957, p. 612.
14. А. П. Глазкова. ПМТФ, 1963, 5, 121—125.
15. К. К. Андреев. Сборник статей по теории ВВ. Под ред. К. К. Андреева и Ю. Б. Харитона. М., Оборонгиз, 1940.
16. Н. Н. Бахман. ПМТФ, 1963, 6, 120—121.
17. А. Д. Марголин. ЖФХ, 1964, 38, 6.
18. T. Tsucholski. Roczniki. Chem., 1933, 13, 435.
19. А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1960, 135, 6.
20. Б. Н. Кондриков, Б. С. Светлов, А. Е. Фогельзанг. Теория ВВ. Сборник статей под ред. К. К. Андреева. Изд-во «Высшая школа», М., 1967.