

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ПЕРИОДАТОВ И ЙОДАТОВ

A. E. Фогельзанг, В. Я. Аджемян, Б. С. Светлов

(Москва)

В работах [1—5] было показано, что скорость горения взрывчатых соединений (ВС), содержащих в молекуле различные окислители тем выше, чем больше активность последнего. Исходя из этого и опираясь на результаты работы [3], можно было ожидать, что соединения, содержащие в молекуле окислитель J^{7+} , будут гореть со скоростями, превышающими скорости горения таких быстрогорящих соединений, как органические перхлораты [1, 2, 5]. Исследование горения солей иодной кислоты позволило бы проверить справедливость высказанного в работе [4] предположения о возможности предсказывать относительные нормальные скорости горения ВС на основании данных об активности окислителя, входящего в их молекулы. Кроме того, поскольку соединения с окислительными иодсодержащими группировками раньше не рассматривались, представляло интерес исследовать горение также и органических солей иодноватой кислоты.

В этой связи были синтезированы и исследованы дипериодат и диодат этилендиамина, периодаты и иодаты метиламина, изобутиламина, гексиламина, бензиламина, гуанидина, периодаты формамидина, три- и тераметиламмония, иодаты анилина и ортотолуидина и гидро-диодат бензиламина.

Получение, очистка и характеристики исследованных веществ; методика проведения эксперимента

Периодаты метиламина, триметиламина, изобутиламина, гексиламина и бензиламина получали при взаимодействии спиртовых растворов дигидрата иодной кислоты и соответствующего амина. Осадок, иногда выпадавший при слиянии растворов, отфильтровывали и затем реакционную массу разбавляли эфиром 1:10 для выделения периодата. Периодат тетраметиламмония получали при взаимодействии водных растворов метапериодата лития и нитрата тетраметиламмония. Для получения периодата гуанидина концентрированный спиртовой раствор дигидрата иодной кислоты нейтрализовали расчетным количеством бикарбоната гуанидина. Реакционную массу фильтровали и разбавляли эфиром 1:10. Периодат формамидина получали, присыпая к подогретому до 50°С водному раствору HJ_4 эквимольное количество ацетата формамидина. Периодат выпадал в осадок при охлаждении раствора до 0.

Все периодаты многократно промывали эфиром и сушили под вакуумом до постоянного веса, а затем анализировали на содержание HJ_4 иодометрическим титрованием. Результаты анализов приведены в табл. 1.

Йодаты изобутиламина, гексиламина, анилина, бензиламина и диодат этилендиамина получали взаимодействием соответствующего амина с водным раствором HJ_3 , а иодат метиламина — при взаимодействии спиртовых растворов метиламина и иодноватой кислоты. Соль иодноватой кислоты и *o*-толуидина, получали, приливая к раствору амина в ацетоне водный раствор иодноватой кислоты. Реакции получения иодатов проводили в щелочной среде, создаваемой избытком амина,

Таблица 1

Вещество	Содержание HJO_3 , %	
	теоретическое	по результатам анализа
Дипериодат этилендиамина . . .	86,43	85,59
Периодат метиламина . . .	86,10	85,85
» триметиламина . . .	78,00	77,80
» тетраметиламмония . . .	72,61	73,50
» изобутиламина . . .	72,45	73,00
» гексиламина . . .	65,51	65,80
» бензиламина . . .	64,20	64,10
» формамидина . . .	81,10	80,79
» гуанидина . . .	76,48	75,30

Таблица 2

Вещество	Содержание HJO_3 , %	
	теоретическое	по результатам анализа
Диодат этилендиамина . . .	85,43	85,65
Иодат метиламина . . .	85,01	86,80
» изобутиламина . . .	70,67	70,91
» гексиламина . . .	63,52	63,00
» анилина . . .	65,41	65,70
» о-толуидина . . .	62,40	62,30
» гуанидина . . .	74,85	75,20
» бензиламина . . .	62,20	62,45
Гидродиодат бензиламина . . .	76,68	78,50

или поликарбоната внутренним диаметром 4 мм. Скорость горения фиксировалась фоторегистром ФР-11 (собственное свечение) или кинокамерой «Петафлекс» (отраженный свет).

Результаты экспериментов

Соли иодной кислоты. Зависимости скоростей горения органических периодатов от давления представлены на рис. 1, 2 и в табл. 3. Все периодаты имеют высокие скорости горения. Наибольшей скоростью обладает периодат метиламина: при 400 ат массовая скорость горения этого соединения достигает $122 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, что выше, чем у стиофната свинца — самого быстрогорящего из известных к настоящему времени взрывчатых соединений. Периодат триметиламина оказался способным к устойчивому горению только при $p < 50$ ат. Выше 50 ат горение становится нестабильным — при поджигании происходит взрыв. Дипериодат этилендиамина взрывается при поджигании в интервале давлений от 0,01 до 400 ат. Периодат тетраметиламмония в отличие от нитрата и перхлората [2, 5] устойчиво горит в диапазоне 0,06—400 ат (см. рис. 1). Характерной особенностью периодатов изобутил- и гексиламина является наличие максимума на кривой $u(p)$ при давлениях 40 и 160 ат соответственно. Аналогичную зависимость скорости горения от давления имеют периодаты гуанидина и формамидина. Периодат алкилароматического амина — бензиламина — имеет плато на кривой $u(p)$ (см. рис. 2).

При горении периодатов метиламина (рис. 3) и гуанидина обнаружено вторичное пламя. У периодата метиламина оно возникает над

(10—150% от теории) для того, чтобы исключить возможность образования гидроди- или гидротриодатов. Гидродиодат бензиламина образовывался при взаимодействии водных растворов бензиламина и иодноватой кислоты, в мольном соотношении 1:2. Для получения иодата гуанидина к водному раствору HJO_3 присыпали эквимольное количество карбоната гуанидина.

Иодаты перекристаллизовывали из воды, спирта или ацетона, сушили под вакуумом при комнатной температуре до постоянного веса и анализировали на содержание HJO_3 . Результаты анализов приведены в табл. 2.

Опыты проводили в бомбе постоянного давления по методике, описанной в [1]. Заряды готовили глухим прессованием в трубки из оргстекла

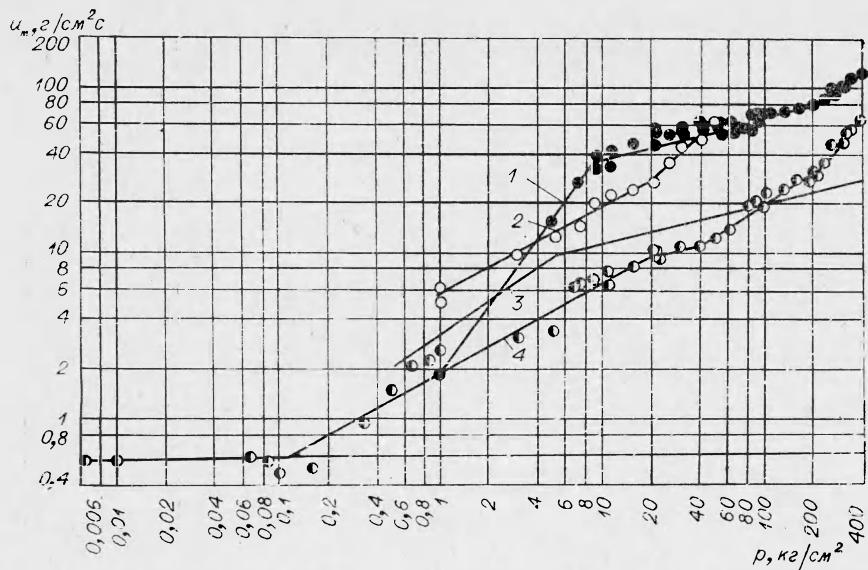


Рис. 1. Зависимость скорости горения от давления периодатов алифатических аминов: метиламина (1), триметиламина (2), тетраметиламмония (3) и периодата аммония [3] (4).

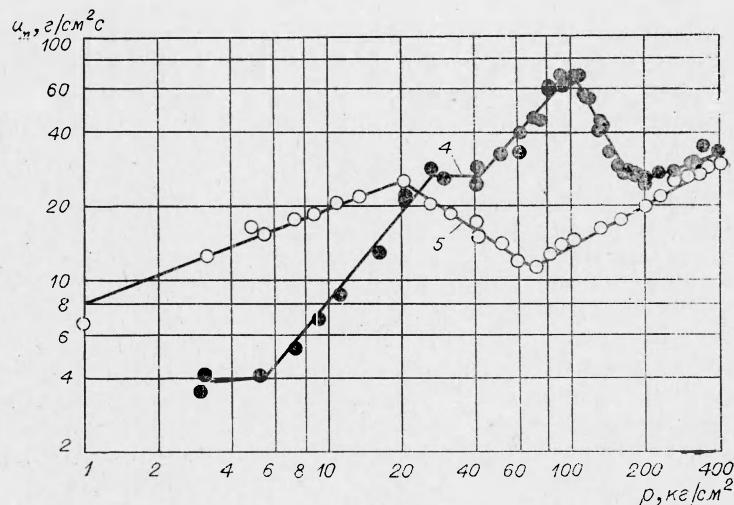
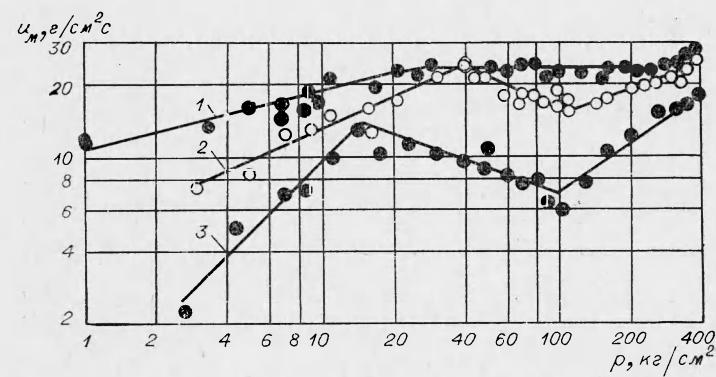


Рис. 2. Зависимость скорости горения от давления периодатов бензиламина (1), изобутиламина (2), гексиламина (3), гуанидина (4) и формамидина (5).

Таблица 3

Взрывчатое соединение	Зависимость скорости горения $\mu_m(p) = Bp^v$			$\mu_m(p=400 \text{ ат})$, г/(см ² ·с)	Термодинамическая температура горения, К (расчет на ЭВМ) при:	
	интервал давлений, ат	B	v		1 ат	100 ат
Дипериодат этилендиамина $(\text{CH}_2\text{NH}_2 \cdot \text{HJO}_4)_2$	0,01—400	<i>Взрывается</i>	—	—	2494	2701
Периодат метиламина $(\text{CH}_3\text{NH}_2 \cdot \text{HJO}_4)$ $\rho_{cp} = 2,60 \text{ г}/\text{см}^3$	1—9	1,9	1,36	122	2305	2452
	9—200	22,0	0,24			
	200—400	3,2	0,61			
Периодат тетраметиламмония $(\text{CH}_3)_4\text{N}^+\text{JO}_4^-$ $\rho_{cp} = 1,90 \text{ г}/\text{см}^3$	0,006—0,9	0,58	0	66	1011	1299
	0,9—180	2	0,51			
	180—400	0,091	1,1			
Периодат триметиламина $(\text{CH}_3)_3\text{N} \cdot \text{HJO}_4$ $\rho_{cp} = 2,08 \text{ г}/\text{см}^3$	1—16	5,8	0,54	65*	1223	1392
	16—50	2,5	0,83			
	50	<i>Взрывается</i>	—			
Периодат бензиламина  $\rho_{cp} = 1,94 \text{ г}/\text{см}^3$	1—35	10,2	0,26	35	1061	1336
	35—190	26,0	0			
	190—400	4,1	0,36			
Периодат гуанидина $\text{C}(\text{NH}_2)_3\text{JO}_4$ $\rho_{cp} = 2,55 \text{ г}/\text{см}^3$	5—29	6,27	1,12	35	2009	2143
	29—40	27,0	0			
	40—100	0,45	1,08			
	100—170	26000	—1,28			
	170—400	7,4	0,26			
Периодат формамидина $\text{HC}(\text{NH}_2)_2\text{JO}_4$ $\rho_{cp} = 2,67 \text{ г}/\text{см}^3$	1—21	8,0	0,36	30	—	—
	21—70	172,0	—0,64			
	70—400	1,05	0,56			
Периодат изобутиламина $(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{NH}_2 \cdot \text{HJO}_4$ $\rho_{cp} = 1,82 \text{ г}/\text{см}^3$	3—40	5,0	0,42	24	971	1244
	40—105	105,0	—0,41			
	105—400	3,2	0,34			
Периодат гексиламина $(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{NH}_2\text{HJO}_4$ $\rho_{cp} = 1,62 \text{ г}/\text{см}^3$	2,5—14,5	0,96	1,0	18	933	1192
	14,5—100	35,0	—0,35			
	100—400	0,25	0,71			

* $p=50$ ат.

поверхностью горения при $p=9$ ат и наблюдается до 85 ат. При более высоких давлениях вторичное пламя сливается с поверхностью. В случае периодата гуанидина наличие вторичного пламени отмечено только при $p=40$ ат.

После сгорания органических периодатов в области низких давлений иод в шлаках практически отсутствует, а основным продуктом превращения окислителя является J_2O_5 . С повышением давления иодноватый ангидрид исчезает и в продуктах горения образуется J_2 . Это можно проследить по изменению интенсивности окраски трубок, остающихся после сгорания периодатов. При низких давлениях ($p=1$ ат или давление, при котором периодат начинает гореть) трубки светло-желтые или прозрачные, содержащие на внутренней поверхности небольшое количество J_2O_5 . У периодатов метиламина, формамидина, тетраметиламмония и гуанидина с повышением давления трубки становятся темными и при $p=5 \div 10$ ат в них появляется иод. С дальнейшим повышением давления количество иода в трубках увеличивается и, наконец, они приобретают темно-фиолетовую, а затем черную окраску. В трубках и на воспламенительной спирале находится мелкокристаллический иод. В случае периодата тетраметиламмония полное потемнение трубок

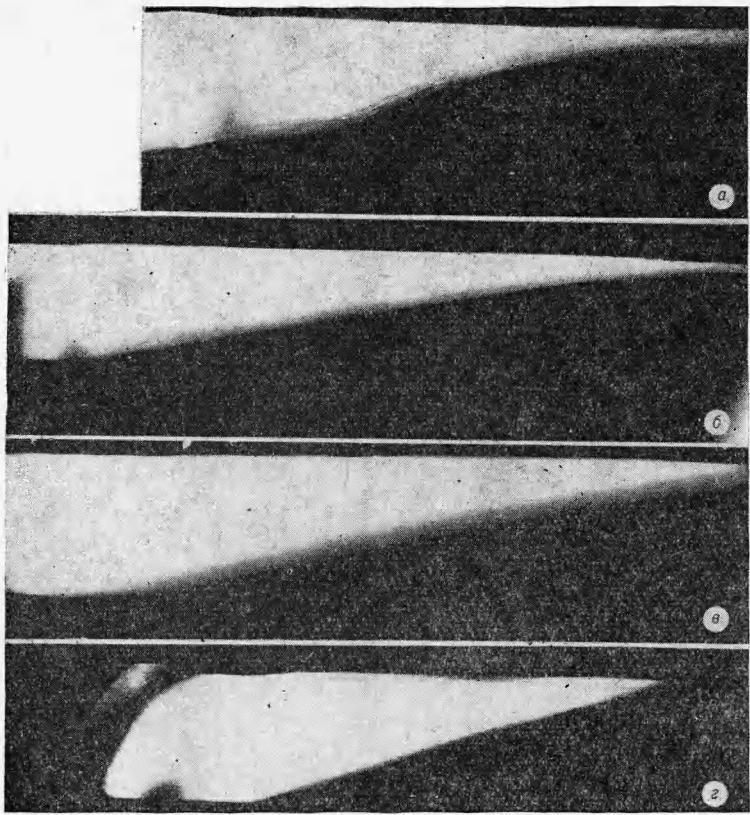


Рис. 3. Фоторегистрограммы процесса горения периода метиламина
(увеличение в 3 раза).
а — $p=9$ ат, $u_d=13$ см/с; б — $p=50$ ат, $u_d=0,23$ см/с; в — $p=85$ ат, $u_d=26$ см/с;
г — $p=400$ ат, $u_d=47$ см/с.

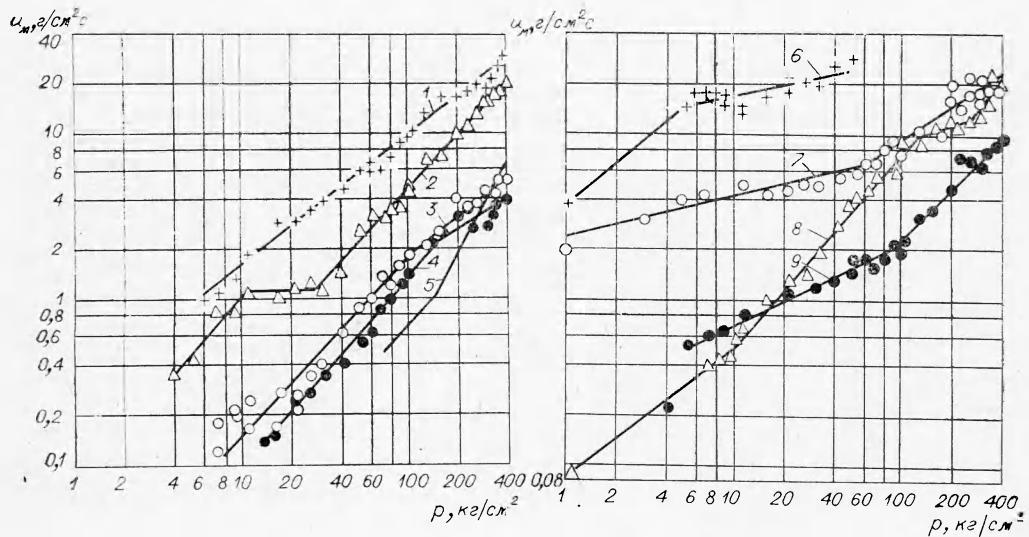
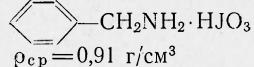
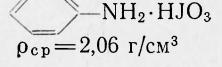
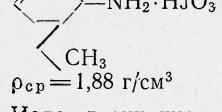
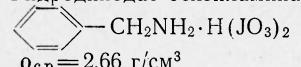


Рис. 4. Зависимость скорости горения от давления динодиамина (1), иодатов:
метиламина (2), изобутиламина (3), гексиламина (4), аммония [3] (5) и иодатов аро-
матических аминов: анилина (6), о-толуидина (7), гидродиодата бензиламина (8),
иодата бензиламина (9).

Таблица 4

Взрывчатое соединение	Зависимость скорости горения $u_M(p) = Bp^v$			$u_M, \text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ($P=400 \text{ ат}$)	Термодинамическая температура горения, К (расчет на ЭВМ) при:	
	интервал давлений, ат	B	v		1 ат	100 ат
1. Иодаты алифатических аминов:						
а) диодат этилендиамина $(\text{CH}_2\text{NH}_2)_2 \cdot 2\text{HJO}_3$ $\rho_{cp}=2,76 \text{ г}/\text{см}^3$	6—400	0,25	0,79	29,0	1531	1675
б) иодат метиламина $(\text{CH}_3\text{NH}_2 \cdot \text{HJO}_3)$ $\rho_{cp}=2,57 \text{ г}/\text{см}^3$	4—11 11—27 27—400	0,072 1,1 0,03	1,13 0 1,09	21,0	1330	1401
в) иодат изобутиламина $(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{NH}_2 \cdot \text{HJO}_3$ $\rho_{cp}=1,90 \text{ г}/\text{см}^3$	7—100 100—400	0,014 0,05	1,06 0,78	5,4	—	1085
г) иодат гексиламина $(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{NH}_2 \cdot \text{HJO}_3)$ $\rho_{cp}=1,66 \text{ г}/\text{см}^3$	14—160 160—400	0,0064 0,116	1,16 0,59	4,0	831	1037
2. Иодат бензиламина  $\rho_{cp}=0,91 \text{ г}/\text{см}^3$	5—90 90—400	0,23 0,0135	0,49 1,10	9,6	949	1194
3. Иодаты ароматических аминов:						
а) иодат анилина  $\rho_{cp}=2,06 \text{ г}/\text{см}^3$	1—5 5—50	3,7 10,5	0,78 0,21	24*	972	1222
б) иодат о-толуидина  $\rho_{cp}=1,88 \text{ г}/\text{см}^3$	1—5 5—45	1,7 3,2	0,52 0,14	—	—	—
4. Иодат гуанидина $\text{C}(\text{NH}_2)_3 \cdot \text{HJO}_3$ $\rho_{cp}=2,67 \text{ г}/\text{см}^3$	45—400 40—400	0,42 0,0038	0,67 1,25	23,0 6,8	1142	1196
5. Гидродиодат бензиламина  $\rho_{cp}=2,66 \text{ г}/\text{см}^3$	1—9 9—120 120—250 250—400	0,084 0,039 1,4 0,04	0,8 1,15 0,38 1,03	— — — 19,0	—	—

*) Скорость горения при 50 ат.

происходит при $p \approx 15$ ат, у периодата формамида при $p \approx 50$ ат, а у периодатов метиламина и гуанидина — при давлении ≈ 90 ат. С дальнейшим повышением давления окраска трубок не меняется. Трубки, остающиеся после сгорания периодатов изобутиламина и гексиламина, переходной окраски не имеют, поскольку при горении этих соединений образуется большое количество сажи.

Соли иодноватой кислоты. На рис. 4, 1—5 и в табл. 4 представлены зависимости скорости горения от давления иодатов алифатических аминов. Наиболее быстрогорящим из этих соединений является диодат этилендиамина: скорость горения этого соединения при 400 ат достигает $29 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Моноиодаты горят с меньшей скоростью, причем величина скорости горения этих соединений при прочих равных условиях тем ниже, чем длиннее углеводородная цепочка исходного амина. При сравнении иодатов алифатических аминов с иодатом аммония [3] видно, что органические иодаты практически во всем изученном интервале давлений горят быстрее, чем NH_4JO_3 . Однако при высоких дав-

лениях (>300 ат) иодат аммония сначала сравнивается, а затем и обгоняет по скорости горения иодаты изобутиламина и гексиламина.

Зависимости $\mu(p)$ иодатов ароматических аминов представлены на рис. 4, 6—9 и в табл. 4. Простейший представитель этого класса соединений — иодат анилина — имеет при атмосферном давлении $\mu_m = 3,7$ г/(см²·с). Скорость горения этого соединения при 50 ат достигает 24 г/(см²·с) и с дальнейшим повышением давления возрастает настолько, что замерить ее имеющимися средствами не удалось¹. Введение метильной группы в бензольное ядро иодата анилина приводит к значительному снижению скорости горения. Иодат *o*-толуидина при 50 ат имеет скорость горения в 4—5 раз ниже, чем у иодата анилина. Интересно отметить, что переход к иодату бензиламина, соединению изомерному иодату *o*-толуидина, но имеющему горючую часть молекулы, не обладающую свойствами, характерными для ароматических аминов, приводит к еще более сильному падению скорости горения. Как видно, скорость горения иодата бензиламина в 2—3 раза ниже, чем у иодата *o*-толуидина. Аналогичные результаты были получены и при изучении горения органических перхлоратов [5]. Введение дополнительной группы JO_3^- в молекулу иодата бензиламина (гидродиодат бензиламина) приводит к увеличению скорости горения.

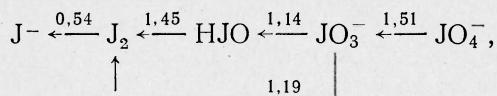
Иодат гуанидина (см. табл. 4) начинает гореть только при $p = 40$ ат со скоростью 0,38 г/(см²·с). Из всех изученных иодатов он имеет самый большой показатель степени в выражении для скорости горения ($\nu = 1,25$).

В исследованном интервале давлений почти все иодаты горят без пламени. Исключение составляют иодат метиламина, дииодат этилендиамина и гидродиодат бензиламина, у которых при $p > 100$ ат наблюдалось фиолетовое свечение. Основным продуктом восстановления окислителя при горении этих соединений является J_2 .

Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные данные подтверждают правильность сделанного в работе [4] предположения о возможности предсказывать относительные нормальные скорости горения взрывчатых соединений на основании данных о реакционной способности окислительных группировок, входящих в их молекулы. Действительно, переход от окислителя Cl^{7+} к J^{7+} позволил увеличить скорость горения приблизительно так же, как переход от N^{5+} к Cl^{7+} [2, 5]. Если сравнить соединения с окислителями N^{5+} , Cl^{7+} и J^{7+} , имеющими одинаковую расчетную температуру горения, то наибольшей скоростью будут обладать именно периодаты (рис. 5). Аналогичная картина наблюдается, если сравнить соли одинаковых аминов: скорости органических периодатов значительно превышают скорости горения органических перхлоратов [5].

На примере органических периодатов подтверждено также предположение о возможности предсказывать появление вторичного пламени, проследив изменение окислительного потенциала в ходе восстановления окислителя. Рассмотрев ряд переходных состояний окислителя J^{7+} [6]



можно увидеть, что на пути от J^{7+} до J^0 имеется J^{5+} , обладающий слабыми окислительными свойствами. Отсюда можно было ожидать появления вторичного пламени при горении периодатов. Действительно при

¹ Иодат анилина не имеет собственного свечения при горении и поэтому скорость горения фиксировалась кинокамерой с максимальной скоростью 100 кадров в секунду.

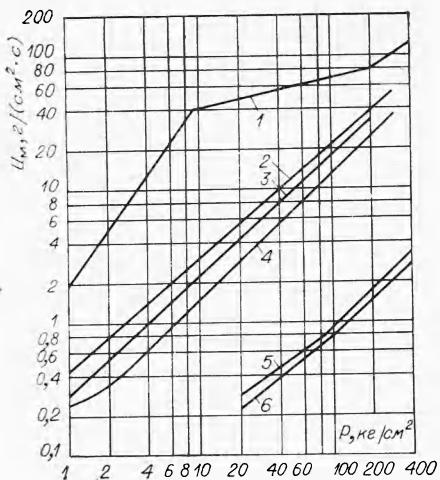


Рис. 5. Зависимость $u(p)$ взрывчатых соединений с расчетной $T_r \approx 2500$ К: периодат метиламина (1), диперхлораты *p*-фенилендиамина (2), *m*-фенилендиамина (3), *o*-фенилендиамина (4), тринитрофенол (5) и тринитробензол (6).

та же картина, что и в случае горения газовых смесей с различными окислителями [7—10], а также при сравнении органических перхлоратов и нитросоединений [5]. В то же время на рис. 6 видно, что наиболее быстрогорящие иодаты (*o*-толуидина и метиламина) при высоких давлениях превосходят по скорости самый медленногорящий периодат гексиламина. Однако здесь следует иметь в виду, что расчетная температура горения периода гексиламина ниже, чем у иодата метиламина (см. табл. 3, 4). Если сравнить периодаты и иодаты, имеющие близкие температуры горения, то, как видно из рис. 7, соединения с более активным окислителем (периодаты) горят быстрее солей, содержащих в молекуле менее активный окислитель.

Однако еще раз необходимо отметить, что соли иодноватой кислоты — малоустойчивые соединения с низкой теплотой взрывчатого превращения — в некоторых случаях горят быстрее соединений, содержащих в молекуле более активный окислитель. Это показывает, что окислительный потенциал в силу своей специфичности, естественно, не может служить единственной характеристикой процесса горения. Действительно, говоря о величине E_0 , мы не оговариваем, где и при какой температуре идет ведущая реакция. Кроме того, как заранее полагается, что ведущей является

горение периодатов метиламина и гуанидина на фоторегистрограммах было обнаружено вторичное пламя. Наличие вторичного пламени при скоростях горения в 10—20 см/с показывает, что, по-видимому, нельзя однозначно связывать низкие скорости горения С- и О-нитросоединений только со стадийностью восстановления окислителя N^{5+} до N^0 .

Сопоставление скоростей горения периодатов и иодатов показывает, что и в этом случае уменьшение активности окислителя приводит к снижению скорости горения. Из рис. 6 и табл. 5 видно, что во всем исследованном диапазоне давлений органические периодаты ($E_0 = 1,51$ В) превосходят по скорости горения аналогичные иодаты ($E_0 = 1,19$ В).

Таким образом при сравнении периодатов и иодатов наблюдается

при горении газовых смесей с различными окислителями [7—10], а также при сравнении органических перхлоратов и нитросоединений [5]. В то же время на рис. 6 видно, что наиболее быстрогорящие иодаты (*o*-толуидина и метиламина) при высоких давлениях превосходят по скорости самый медленногорящий периодат гексиламина. Однако здесь следует иметь в виду, что расчетная температура горения периода гексиламина ниже, чем у иодата метиламина (см. табл. 3, 4). Если сравнить периодаты и иодаты, имеющие близкие температуры горения, то, как видно из рис. 7, соединения с более активным окислителем (периодаты) горят быстрее солей, содержащих в молекуле менее активный окислитель.

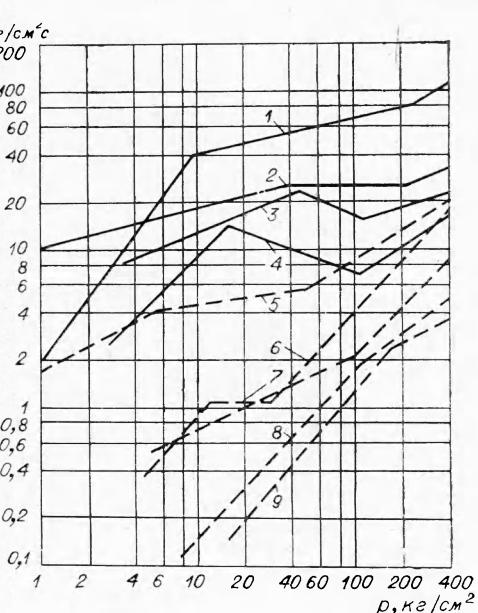


Рис. 6. Зависимость $u(p)$ органических периодатов: метиламина (1), бензиламина (2), изобутиламина (3), гексиламина (4) и иодатов: *o*-толуидина (5), метиламина (6), бензиламина (7), изобутиламина (8) и гексиламина (9).

Таблица 5

Горючее	Скорость горения (г/см ² ·с) при давле- ниях (ат)		
	10	100	400
Метиламин	0,95 39	4,5 64	21 122
Бензиламин	0,7 18,5	2,3 26	9,6 35
Изобутиламин	0,16 13	1,8 16	5,4 24
Гексиламин	— 9,4	1,4 7	4 18

Приложение. В числителе дана скорость горения иодатов, в знаменателе — перидатов.

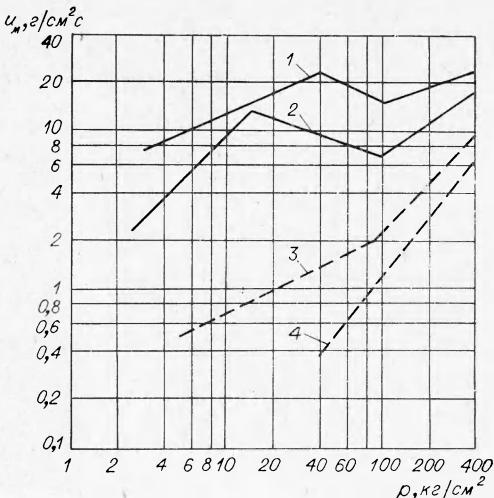


Рис. 7. Зависимости $u(p)$ органических периодатов и иодатов, имеющих расчетные $T_g \approx 1500$ К: периодаты изобутиламина (1), гексиламина (2); иодаты бензиламина (3) и гуанидина (4).

именно реакция окисления — восстановления. По-видимому, это действительно так, если ведущая реакция протекает при высокой температуре и

реакции окисления могут стать лимитирующими, поскольку они идут с меньшей энергией активации, чем реакции распада [11—16]. Если химические превращения не обеспечивают высокой температуры горения, то скорости реакций окисления и распада могут поменяться местами и реакция распада может стать лимитирующей. В этом случае, естественно, активность окислителя, входящего в молекулу ВС, либо оказывает слабое влияние, либо вообще не влияет на величину скорости горения и тогда, как для солей диазония [17], скорость горения может определяться скоростью реакции распада.

Поступила в редакцию
16/V 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Д. Алешин, Б. С. Светлов, А. Е. Фогельзанг. Докл. АН СССР, 1969, 185, 856.
2. А. Е. Фогельзанг, Б. С. Светлов. Докл. АН СССР, 1970, 192, 6.
3. А. Е. Фогельзанг, В. Я. Аджемян, Б. С. Светлов. Докл. АН СССР, 1971, 199, 6.
4. А. Е. Фогельзанг, В. Я. Аджемян, Б. С. Светлов. В сб. «Горение и взрыв». М., «Наука», 1972.
5. А. Е. Фогельзанг, Б. С. Светлов и др. ФГВ, 1972, 8, 2, 257.
6. В. М. Латимер. Окислительные состояния элементов и их потенциалы в водных растворах. М., 1954.
7. G. A. McD. Cummings, A. R. Hall. 10-th Symp. (Int.) on Comb., 1965, 1365.
8. G. S. Pearson. Comb. and Flame, 1967, 11, 89.
9. W. G. Parke, H. G. Wolfhard. 4-th Symp. (Int.) on Comb., 1953.
10. J. Cambourien, G. Moreau a. o. AIAA J., 1970, 3, 594.
11. F. H. Pollard, R. H. H. Wyatt. Trans. Farad. Soc., 1949, 45, 760.
12. A. E. Podler, F. H. Pollard. Trans. Farad. Soc., 1957, 53, 44.
13. P. Gray, A. D. Ioffe. Chem. Rev., 1955, 55, 6, 1069.
14. H. I. Chfieste, H. A. Voisey. Trans. Farad. Soc., 1967, 63, 2702.
15. R. Silverwood, I. R. Thomas. Trans. Farad. Soc., 1967, 63, 2477.
16. Б. С. Светлов, Б. А. Лурье, Г. Е. Корнилова. В сб. «Горение и взрыв». М., «Наука», 1972.
17. А. Е. Фогельзанг, В. Я. Аджемян, Б. С. Светлов. ФГВ, 1974, 10, 3.