

О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЖИДКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ К УДАРУ

А. А. Денисаев, Б. Л. Корсунский, В. И. Пепекин, Ю. Н. Матюшин

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, kors@polymer.chph.ras.ru

Определена чувствительность к удару 58 жидких взрывчатых веществ (ВВ) и расплавов твердых ВВ. Получены корреляционные соотношения между показателем чувствительности жидких ВВ и максимальной объемной теплотой взрыва, которые позволяют прогнозировать чувствительность жидких ВВ исходя из физико-химических свойств и элементного состава ВВ. Рассмотрен вопрос о предельных возможностях жидких ВВ.

Ключевые слова: жидкие взрывчатые вещества, чувствительность к удару, соотношение структура — свойство.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что рост энергоемкости взрывчатых веществ (ВВ), как правило, приводит к повышению их чувствительности и снижению безопасности. Поскольку чувствительность относится к числу важнейших характеристик ВВ, крайне желательно располагать способом ее предсказания на основе доступных экспериментальных и расчетных данных.

В [1–3] для широкого класса твердых ВВ прослежены корреляции между чувствительностью к удару и кислородным коэффициентом. В этих работах так называемый кислородный коэффициент OV_{100} рассчитывали в предположении, что в результате взрывного разложения водород превращается в воду, углерод — в CO , а азот — в N_2 . Одновременно учитывалось наличие в молекулах ВВ карбоксильных групп. О чувствительности ВВ судили по высоте падения груза массой 2.5 кг, обеспечивающей 50 % взрывов (H_{50}). В результате удалось проследить линейные корреляции между величинами OV_{100} и $\log(H_{50})$, причем для каждого класса веществ (тринитрометильные соединения, нитрамини и др.) выполнялась своя корреляция. В работах [4, 5] для твердых ВВ установлена линейная корреляция между максимальной теплотой взрыва и критическим давлением инициирования. При этом максимальная теплота взрыва Q_{\max} рассчитывалась общепринятым способом: предполагалось, что при взрыве водород превращается в воду, углерод — в CO_2 , а азот — в N_2 . Как максимальная теплота взрыва, так и критическое давление ини-

цирования имеют вполне определенный физический смысл. Поэтому корреляцию, полученную в [4, 5], нельзя рассматривать как чисто эмпирическую, и есть надежда, что она отражает реальные процессы в ходе возбуждения взрыва. Следует отметить, что величина Q_{\max} (правда, не объемная, а массовая) ранее уже использовалась для установления ее корреляций с различными характеристиками ВВ. Так, в [6] для твердых ВВ получены нелинейные зависимости между Q_{\max} и ударно-волновой чувствительностью, критической толщиной детонации и чувствительностью к механическому удару.

Для жидких ВВ подобные корреляции структура — свойство отсутствуют. В настоящей работе представлены результаты исследования чувствительности большого числа жидких ВВ и предпринята попытка установления зависимостей между их физико-химическими свойствами и показателем чувствительности к удару.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Чувствительность жидких ВВ определялась в опытах на копке К-44-11 методом поднятого ролика («дробного» удара) [7] с грузом массой 5 кг с использованием испытательного прибора № 4 по ГОСТ 4545-80 [8]. Указанный прибор отличается от приборов, применяемых при испытании твердых ВВ, большим диаметром роликов (19 мм). Нижний ролик жестко фиксируется, верхний может свободно перемещаться и удерживается при помощи пружинного прижимного устройства на высоте 5 мм над торцом нижнего ролика, на котором располагается навеска (капля) жидкого ВВ массой $5 \div 7$ мг. После падения груза на верхний ролик

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-03-00076).

последний приобретает скорость движения, в 1.5 раза превышающую скорость груза (вследствие большого различия масс). Ролик ударяет по капле жидкого ВВ, отскакивает навстречу грузу, вновь ударяет по капле и т. д. — происходит так называемый «дробный» удар по капле жидкого ВВ. При первом ударе и отскоке ролика в жидком ВВ образуется множество кавитационных пузырьков, схлопывание которых приводит к взрыву, если скорость последующего удара верхнего ролика достаточно велика.

Инициирование взрывов на копре имеет вероятностный характер, т. е. при некоторой фиксированной высоте сбрасывания груза H в серии параллельных опытов взрывы происходят с некоторой вероятностью (частотой) $f = N_+/N_0 \cdot 100\%$ (N_+ — число взрывов, N_0 — общее количество опытов в серии). С увеличением H в диапазоне $H_0 < H < H_{100}$ вероятность взрывов изменяется в интервале $f = 0 \div 100\%$. Зависимость $f(H)$ в графическом представлении называют кривой частоты взрывов. Наиболее достоверной точкой этой зависимости является величина H_{50} , при которой $f = 50\%$. В данной работе для определения чувствительности жидких ВВ проводилось 5 ÷ 6 серий из 25 параллельных опытов при различных значениях H , по результатам которых строили кривые $f(H)$ и находили значения H_{50} .

Из физического механизма «дробного» удара следует, что интенсивность схлопывания кавитационных пузырьков определяется скоростью перемещения ролика, которая, в свою очередь, прямо пропорциональна скорости груза в момент удара $W = \sqrt{2gH}$. Поэтому для анализа экспериментальных данных целесообразно использовать показатель $\sqrt{H_{50}}$.

Максимальное значение H на копре К-44-11 составляет 110 см, и жидкие ВВ, которые совсем не взрывались при сбрасывании груза с этой высоты, в данной работе не анализировались. Однако в опытах с некоторыми веществами при $H = 100 \div 110$ см в сериях параллельных опытов наблюдались отдельные случаи инициирования. Для таких жидких ВВ можно было достаточно надежно оценить значения H_{50} , считая, что они находятся в пределах 130 ÷ 160 см, и использовать эти данные для анализа зависимости чувствительности жидких ВВ от их энергосодержания.

Наряду с жидкими ВВ, в работе исследовались некоторые твердые при нормальных усло-

виях ВВ в расплавленном состоянии. Для этого прибор «дробного» удара был оборудован электрическим термостатом [9].

Следует отметить высокую воспроизводимость результатов испытаний жидких ВВ методом «дробного» удара. В период активного внедрения метода в лабораторную практику проводилось сопоставление значений H_{50} , полученных в различных НИИ. Расхождение результатов не превышало 10 %.

Всего было исследовано более 100 веществ, однако некоторые из них оказались слишком малочувствительными, а для ряда веществ не удалось получить достоверных значений плотности и энтальпии образования, необходимых для расчета теплоты взрыва. Отмечено также несколько случаев разложения образцов жидкого ВВ при хранении. Эти вещества отбраковывались. Не рассматривались также вещества, которые сильно отличались от остальных своими физико-механическими свойствами (очень вязкие и легколетучие). В итоге для анализа было отобрано 58 веществ.

При проведении расчетов максимальной теплоты взрыва для таких широко распространенных ВВ, как тротил, нитроглицерин и т. п., использовались хорошо известные литературные данные по энтальпии образования. В большинстве же случаев энтальпия образования определялась стандартным калориметрическим методом по теплоте сгорания, измеренной с погрешностью 0.01 %, и, кроме того, рассчитывалась по аддитивной схеме с учетом взаимодействия между функциональными эксплозифорными группами [10]. Погрешность расчетных значений ΔH_f составляла 0.1 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты измерений представлены в таблице. В ней, в частности, указаны температуры, при которых определялась чувствительность: как отмечено выше, при нормальных условиях некоторые из исследованных веществ твердые. В этих случаях чувствительность определялась при температурах, несколько превышающих температуру плавления. Помимо значений величины $\sqrt{H_{50}}$ и энтальпии образования, таблица содержит рассчитанные по закону Гесса максимальные теплоты взрыва Q_{\max} (как это общепринято, в предположении, что при взрыве водород превращается в воду, углерод — в CO_2 , а азот —

Физико-химические и взрывчатые характеристики жидких ВВ

№ п/п	Соединение	H_{50} , см	T , °C	ΔH_f^0 , ккал/моль	ρ , г/см ³	Q_{\max} , ккал/г	ρQ_{\max} , ккал/см ³
1	$C(CH_2ONO_2)_4$	2.7	142	-133.3	1.60	1.633	2.61
2	$O_2NOCH_2C=N-O-N(\rightarrow O)=CCH_2ONO_2^*$	4.5	20	-10.3	1.64	1.73	2.84
3	$O_2NOCH_2CH(ONO_2)CH_2ONO_2$	5.6	20	-89	1.60	1.603	2.56
4	$O_2NOCH_2C=N-O-N=CCH_2ONO_2^*$	7.5	20	-11.4	1.58	1.638	2.58
5	$O_2NOCH_2CH_2ONO_2$	17.0	20	-59.9	1.49	1.742	2.60
6	$(O_2N)_3CCH_2CH_2CN$	29.0	20	-12	1.52	1.533	2.33
7	$O_2NOCH_2CH_2OCH_2CH_2ONO_2$	32.0	20	-87.6	1.39	1.667	2.32
8	$FC(NO_2)_2CH_2OCH_2OCH_2C(NO_2)_2F$	40.0	20	-178	1.60	1.451	2.32
9	$O_2NC=N-O-N=C-C=N-N(CH_2CH_3)-N=N^*$	57.0	20	111	1.42	1.477	2.06
10	2,4,6-(NO ₂) ₃ C ₆ H ₂ OH	76.0	123	-49.84	1.58	1.359	2.15
11	2,4,6-(NO ₂) ₃ C ₆ H ₂ CH ₃	100.0	82	-13.1	1.47	1.399	2.06
12	1,3,5-(NO ₂) ₃ C ₆ H ₃	65.0	125	-9.00	1.56	1.432	2.23
13	CH ₃ NO ₂	160	20	-27.30	1.13	1.62	1.83
14	CH ₃ CH ₂ ONO ₂	160	20	-45.5	1.11	1.635	1.815
15	1,3-(NO ₂) ₂ C ₆ H ₄	160	82	2.9	1.40	1.39	1.946
16	$O_2NC=N-O-N=C-C=N-N(CH_3)-N=N^*$	21.5	42	111.9	1.55	1.446	2.24
17	$O_2NC=N-O-N=C-C=N-N(CH_2CH_2CH_3)-N=N^*$	80	20	102.0	1.34	1.384	1.86
18	$O_2NC=N-O-N=C-C=N-N(CH_2CH_2NO_2)-N=N^*$	21.5	50	96.3	1.55	1.406	2.18
19	$O_2NO(CH_2)_4ONO_2$	67	20	-83.0	1.32	1.58	2.08
20	$CH_3ON=N(\rightarrow O)C(NO_2)_2CH_3$	9.5	32	-1.7	1.41	1.776	2.51
21	$(NO_2)_3CCH_2O(CH_2)_3OCH_2C(NO_2)_3$	9	20	-111.1	1.59	1.626	2.59
22	$(NO_2)_3CCH_2O(CH_2)_2OCH_2C(NO_2)_3$	7.5	35	-104.6	1.60	1.647	2.64
23	$CF_2=[OCH_2C(NO_2)_3]_2$	20.0	20	-166	1.71	1.283	2.19
24	$CF_2=[OCH_2C(NO_2)_2F]_2$	100	20	-271.0	1.67	1.213	2.03
25	$FC(NO_2)_2N=N(\rightarrow O)OCH_2CH_2ON(\rightarrow O)=NC(NO_2)_2F$	7.0	32	-35.1	1.64	1.606	2.63
26	$O_2NOCH_2CH(ONO_2)CH_2CH_2CH_2ONO_2$	25.5	20	-103.9	1.46	1.628	2.38
27	$O_2NC=N-O-N=CC=N-O-C(CH_2NO_2)=N^*$	21.5	60	42	1.68	1.428	2.4
28	$O_2NO(CH_2)_6ONO_2$	160	20	-96	1.23	1.509	1.85
29	$CH_3N=N(\rightarrow O)C(NO_2)_2CH_2CH_3$	25	20	-10.2	1.37	1.615	2.21
30	$CH_3CH_2N=N(\rightarrow O)C(NO_2)_2CH_3$	35	20	-7.6	1.36	1.629	2.21
31	$CH_3N=N(\rightarrow O)C(NO_2)_2CH_3$	16	46	-0.5	1.50	1.677	2.52
32	$O_2NC=N-O-N=CC=N-O-C(CH_2ONO_2)=N^*$	25	20	31	1.64	1.479	2.41
33	$O_2NC=N-O-N=CC=N-O-C(CH_2CH_3)=N^*$	110	20	48.92	1.42	1.376	1.95
34	$O_2NC=N-O-N=CC=N-O-C(CH_2OH)=N^*$	100	20	50.4	1.47	1.373	2.02

Физико-химические и взрывчатые характеристики жидких ВВ (продолжение)

№ п/п	Соединение	H_{50} , см	T , °C	H_f^0 , ккал/моль	ρ , г/см ³	Q_{\max} , ккал/г	ρQ_{\max} , ккал/см ³
35	$(N_3CH_2)_2NNO_2$	1.8	20	158.6	1.45	1.716	2.49
36	$N_3CH_2CH_2N(NO_2)CH_2N(NO_2)CH_2CH_2N_3$	10.0	20	147	1.48	1.566	2.31
37	$O_2NC=N-O-N=CN_3^*$	14.5	20	127.8	1.57	1.724	2.71
38	$(N_3CH_2CH_2)_2N-NO_2$	20.0	20	151	1.36	1.643	2.23
39	$CH_3N(NO_2)CH_2N(NO_2)CH_2CH_2N_3$	30.0	40	67.4	1.41	1.578	2.22
40	$CH_3N(NO_2)CH_2CH_2N_3$	70.0	20	67	1.27	1.497	1.9
41	$O_2NC=N-O-N=CC=N-O-C(CH_2N_3)=N^*$	37	20	133.0	1.56	1.439	2.24
42	$N_3C(O)C=N-O-N=CC(NO_2)_3^*$	11.5	20	145.7	1.63	1.646	2.68
43	$N_3C(O)C=N-O-N(\rightarrow O)=C(O)N_3^*$	1.5	20	147.0	1.70	1.495	2.543
44	$(N_3CH_2N(NO_2)CH_2CH_2CH_2)_2$	59	32	125.0	1.32	1.354	1.79
45	$N\equiv CN=N(\rightarrow O)C=NON=CC=NOC(CH_2N_3)=N^*$	85	20	198	1.55	1.443	2.02
46	$O_2NC=N-O-N=C-C=N-C(CH_2N_3)=N-O^*$	45	20	150.7	1.57	1.513	2.37
47	$CH_3C=N-C(CH_2N_3)=N-O^*$	160	20	71.83	1.22	1.105	1.35
48	$N_3CH_2C=N-C(CH_3)=N-O^*$	160	20	78.18	1.22	1.15	1.4
49	$N_3C=N-O-N=C-N-N=N-C(NO_2)=CH^*$	5	20	175	1.60	1.465	2.34
50	$N_3CH_2N(NO_2)CH_3$	5.0	20	72.6	1.50	1.631	2.45
51	$N_3CH_2N(NO_2)-(CH_2)_6-N(NO_2)CH_2N_3$	59	20	125	1.32	1.374	1.81
52	$CH_3N(NO_2)CH_2N(NO_2)CH_2CH_2ONO_2$	40.0	60	-38.7	1.50	1.617	2.43
53	$2,4,6-(NO_2)_3C_6H_2N(NO_2)CH_3$	18.0	130	4.7	1.65	1.513	2.5
54	$O_2NC=N-O-N=C-N(NO_2)CH_3^*$	41.0	20	62.9	1.56	1.746	2.72
55	$CH_3N(NO_2)CH_2CH_2ONO_2$	120.0	40	-45.7	1.45	1.6	2.32
56	$CH_3N(NO_2)CH_2N(NO_2)CH_3$	120.0	55	-12.3	1.42	1.591	2.26
57	$CH_3N(NO_2)CH_2N(NO_2)CH_2CH_3$	160.0	20	-16.6	1.36	1.467	2.0
58	$O_2NN(CH_2CH_2ONO_2)_2$	26.0	52	-70	1.60	1.631	2.61

Примечание. *По техническим причинам в формулах веществ некоторые связи между атомами не указаны. Эти связи легко увидеть из соображений валентности.

в N_2), а также максимальные объемные теплоты взрыва ρQ_{\max} .

Далее, по аналогии с [4, 5] мы попытались установить линейную корреляцию между максимальными объемными теплотами взрыва и чувствительностью. Оказалось, однако, что если использовать весь массив данных, представленных в таблице, то в координатах $\rho Q_{\max} - \sqrt{H_{50}}$ наблюдается очень большой разброс точек относительно линии тренда, характеризуемый коэффициентом корреляции $r = 0.6$. Согласно эмпирическим правилам статистики,

такое значение r свидетельствует лишь о тенденции к линейной зависимости параметров. Вполне понятно из химических соображений, что различным типам функциональных и эксплозифорных групп соответствуют различные энергетические характеристики и, возможно, даже различные механизмы начальной стадии разложения. Поэтому исследованные ВВ были далее разбиты нами на классы в соответствии с их химической природой, аналогично подходу, использованному ранее в работах [1–3]. Полученные результаты представлены на рис. 1–5.

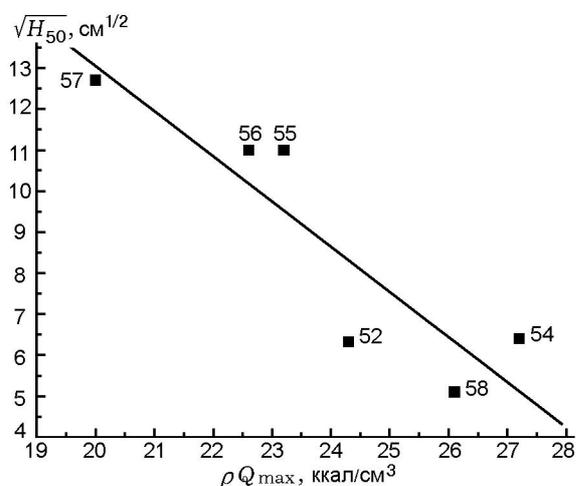


Рис. 1. Корреляция между чувствительностью к удару нитраминов, не содержащих азидных групп, и их максимальными объемными теплотами взрыва

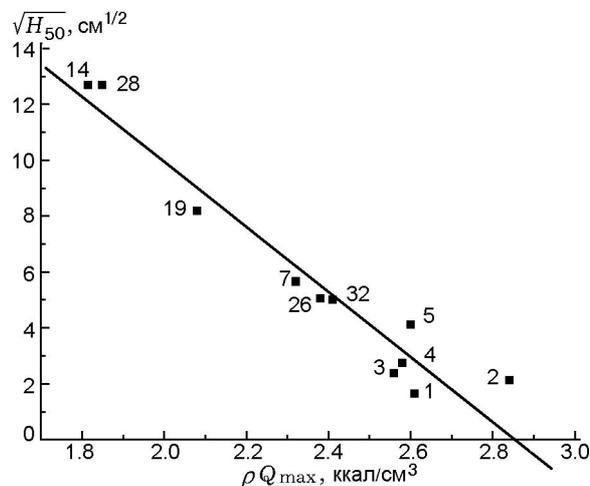


Рис. 3. Корреляция между чувствительностью нитратов, не содержащих азидных и нитраминных групп, и их максимальными объемными теплотами взрыва

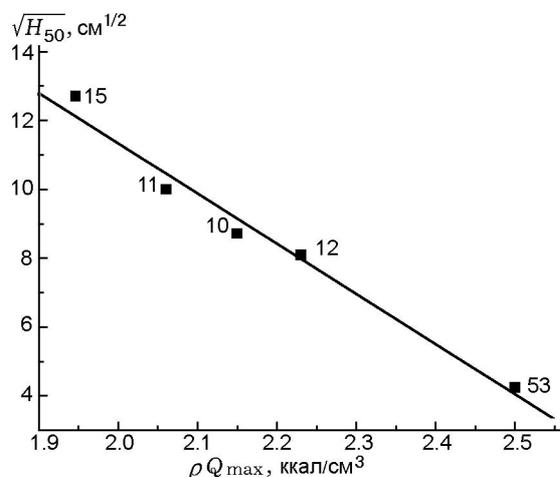


Рис. 2. Корреляция между чувствительностью к удару ароматических нитросоединений и их максимальными объемными теплотами взрыва

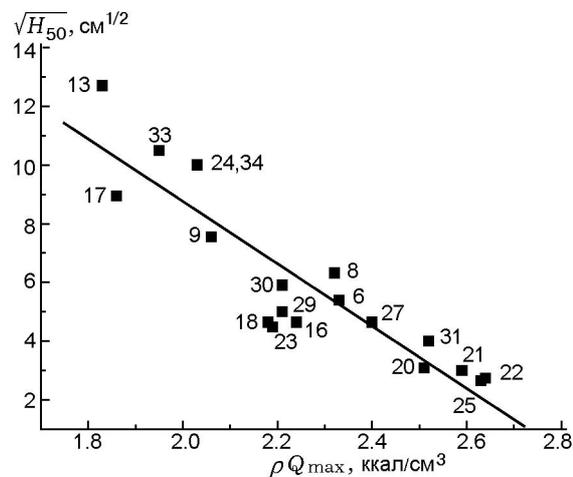


Рис. 4. Корреляция между чувствительностью алифатических нитросоединений, не содержащих азидных и нитраминных групп, и их максимальными объемными теплотами взрыва

Номера точек на рисунках соответствуют номерам веществ в таблице.

Полученные количественные соотношения имеют следующий вид.

Нитрамины, не содержащие азидных групп:

$$\sqrt{H_{50}} = (35.1 \pm 6.6) - (11.0 \pm 2.8)\rho Q_{\max},$$

$$r = 0.894. \quad (1)$$

Ароматические нитросоединения:

$$\sqrt{H_{50}} = (40.4 \pm 2.7) - (14.6 \pm 1.2)\rho Q_{\max},$$

$$r = 0.990. \quad (2)$$

Нитраты, не содержащие азидных и нитраминных групп:

$$\sqrt{H_{50}} = (33.2 \pm 2.5) - (11.6 \pm 1.0)\rho Q_{\max},$$

$$r = 0.966. \quad (3)$$

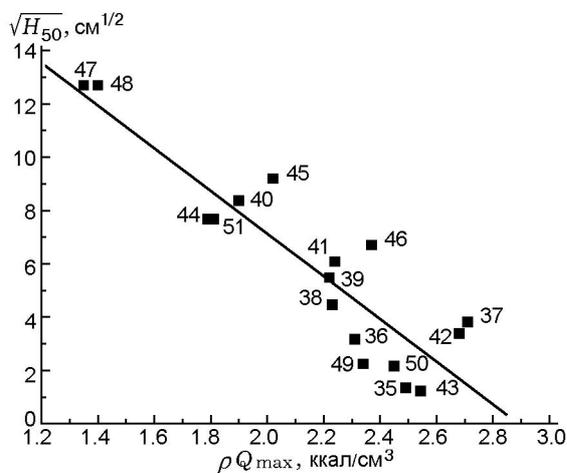


Рис. 5. Корреляция между чувствительностью органических азидов и их максимальными объемными теплотами взрыва

Алифатические нитросоединения, не содержащие азидных и нитраминных групп:

$$\sqrt{H_{50}} = (30.0 \pm 2.8) - (10.6 \pm 1.3)\rho Q_{\max},$$

$$r = 0.899. \quad (4)$$

Азиды:

$$\sqrt{H_{50}} = (23.2 \pm 2.2) - (8.0 \pm 1.0)\rho Q_{\max},$$

$$r = 0.900. \quad (5)$$

Здесь $\sqrt{H_{50}}$ — в $\text{см}^{1/2}$, ρQ_{\max} — $\text{ккал}/\text{см}^3$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные корреляционные зависимости представляют весьма полезными, поскольку позволяют предсказывать чувствительность жидких ВВ исходя только из энтальпий их образования и плотности. Эти зависимости, как уже говорилось выше, включают величины, имеющие вполне определенный физический смысл. Действительно, величина $\sqrt{H_{50}}$ пропорциональна скорости груза в момент удара, а следовательно, и величине импульса, передаваемого ВВ. Что же касается максимальной теплоты взрыва, то в [4] отмечалось, что она весьма близка (хотя и не равна) теплоте, выделяющейся в детонационной волне еще до начала расширения продуктов. Правда, при

инициировании жидких ВВ детонации не происходит; взрыв осуществляется до того, как достигаются температура и давление детонации. Иными словами, цепочка химических превращений не доходит до образования только H_2O , CO_2 , N_2 и C . Соответственно при инициировании взрыва ударом выделяется не вся теплота детонации, а лишь некоторая ее часть. Мы предполагаем, что в зависимости от типа функциональных эксплозифорных групп упомянутая цепочка превращений происходит в разной степени. Для одного класса веществ она успевает пройти до весьма больших глубин, и потому тепла выделяется больше, а сами вещества этого класса более чувствительны. В то же время для другого класса веществ, с другими эксплозифорными группами, превращение доходит до меньших глубин, тепла выделяется меньше, и эти вещества менее чувствительны. Заметим, что в работах [1–3] также подчеркивалось влияние скорости превращения на чувствительность ВВ. На рис. 6 показаны зависимости, описываемые уравнениями (1)–(5). Из них видно, что при данной максимальной теплоте взрыва наибольшей чувствительностью обладают органические азиды. Следует отметить, что при разложении взрывчатых нитросоединений первый акт распада, как прави-

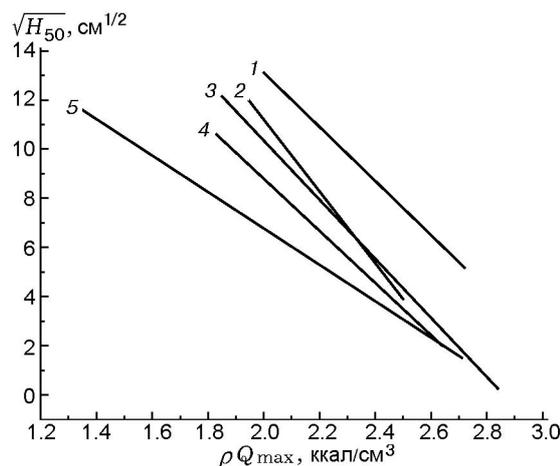


Рис. 6. Зависимости, описываемые уравнениями (1)–(5):

1 — нитрамины, не содержащие азидных групп, уравнение (1); 2 — ароматические нитросоединения, уравнение (2); 3 — нитраты, не содержащие азидных и нитраминных групп, уравнение (3); 4 — алифатические нитросоединения, не содержащие азидных и нитраминных групп, уравнение (4); 5 — органические азиды, уравнение (5)

ло, эндотермичен, так как он связан с разрывом химической связи. Лишь в последующей цепочке превращений протекают экзотермические реакции, компенсирующие первичные затраты. Поэтому при взрыве выделяется энергия всех успешных пройги экзотермических реакций за вычетом той энергии, которая потребовалась на компенсацию энергозатрат в первой стадии. В случае же органических азидов экзотермична уже первая стадия, в которой выделяется молекулярный азот. Никакой компенсации энергетических затрат здесь не требуется, и, возможно, именно поэтому азиды обладают большей чувствительностью.

Полученные в работе результаты позволяют поставить вопрос о предельных возможностях жидких ВВ. Для твердых ВВ этот вопрос обсуждался ранее в [5]. Если в уравнениях (1)–(5) принять $H_{50} = 0$, то мы получим значения максимальных объемных теплот взрыва, при которых ВВ существовать не может, оно будет взрываться самопроизвольно. Оказывается, что, хотя каждый класс ВВ в координатах $\sqrt{H_{50}}-Q_{\max}$ характеризуется своей зависимостью, все они могут быть экстраполированы к величине Q_{\max} , находящейся в весьма узком диапазоне, а именно $2.8 \div 3.2$ ккал/см³. Из таблицы легко усмотреть, что этот предел практически уже достигнут. Так, вещество № 2 в этой таблице имеет $\rho Q_{\max} = 2.84$ ккал/см³. Отсюда, как и в случае твердых ВВ, следует, что поиск более мощных, чем ныне существующие, жидких ВВ бесперспективен; такие жидкие ВВ будут иметь неприемлемо высокую чувствительность.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что указанные выше предельные значения ρQ_{\max} для жидких ВВ заметно меньше, чем для твердых. Для последних в [5] приведено значение 4.1 ккал/см³. Очевидно, что это различие связано с принципиально различным механизмом возбуждения взрыва в жидких и твердых ВВ. Несомненно также, что физико-механические свойства ВВ оказывают влияние на их чувствительность к удару. Но если сравнивать вещества, близкие по указанным свойствам, как это сделано в настоящей работе и в работе [5], то главным фактором, определяющим чувствительность к удару, становится их энергосодержание.

ВЫВОДЫ

- Исследована чувствительность к удару

58 жидких ВВ.

- Найдены корреляционные соотношения между чувствительностью жидких ВВ и максимальной объемной теплотой взрыва. Показана прогнозирующая возможность корреляционных соотношений.

- Проанализирован вопрос о предельных возможностях жидких ВВ. Сделан вывод о бесперспективности синтетических поисков жидких ВВ, более мощных, чем ныне существующие. Следует отметить, что к аналогичному выводу применительно к твердым ВВ пришли авторы работы [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Kamlet M. J. The relationship of impact sensitivity with structure of organic high explosives. I. Polynitroaliphatic explosives // Prepr. Pap. 6th Symp. (Intern.) Detonation. San Diego, Calif., 1976. — P. 276–288.
2. Kamlet M. J., Adolph H. G. The relationship of impact sensitivity with structure of organic high explosives. I. Polynitroaromatic explosives // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. — 1979. — V. 4, N 2. — P. 30–34.
3. Kamlet M. J., Adolph H. G. Some comments regarding the sensitivities, thermal stabilities, and explosive performance characteristics of fluorodinitromethyl compounds // The Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. Annapolis, Maryland, 1981. — V. I. — P. 60–67.
4. Пепекин В. И., Корсунский Б. Л., Денисаев А. А. Об энергетике процесса возбуждения взрыва // Докл. АН. — 2008. — Т. 420, № 2. — С. 193–195.
5. Пепекин В. И., Корсунский Б. Л., Денисаев А. А. Возбуждение взрыва твердых взрывчатых веществ при механическом воздействии // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 5. — С. 101–105.
6. Смирнов С. П., Колганов Е. В., Кулакевич Я. С., Хворов Ф. Т., Смирнов А. С. Связь чувствительности к механическим и ударно-волновым воздействиям с составом и строением ВВ // Сб. докл. науч. конф. Волжского регион. центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». — Саров: ВНИИЭФ, 2000. — С. 418–421.
7. Денисаев А. А., Дубовик А. В., Боболев В. К. Иницирование жидких взрывчатых веществ при ударе на копре методом поднятого ролика // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 2. — С. 238–244.
8. ГОСТ 4545-80. Вещества взрывчатые. Методы определения чувствительности к удару. — М.: Изд-во стандартов, 1981.

9. Денисаев А. А., Дубовик А. В. Влияние температуры на чувствительность ВВ к удару // Взрывное дело, № 89/46. — М.: Недра, 1986. — С. 47–51.
10. Мирошниченко Е. А., Лебедев В. П., Матюшин Ю. Н., Воробьев А. Б., Иноземцев Я. О., Воробьева В. П. Термодинамические свойства замещенных полициклических углеводородов // Хим. физика. — 2002. — Т. 21, № 6. — С. 8–13.
11. Колганов Е. В., Смирнов С. П., Смирнов А. С. Прогноз уровней мощности и безопасности перспективных ВВ // Экстремальное состояние вещества, детонация, ударные волны: сб. тез. докл. междунар. конф. «IX Харитоновские тематические научные чтения». — 2007. — С. 27–29.

*Поступила в редакцию 2/VII 2008 г.,
в окончательном варианте — 10/II 2009 г.*
