

УДК 54.427.6 (621.8.031.4)

**ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВА
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВВ
К УДАРУ И ТРЕНИЮ***Б. Н. Кондриков**Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
125190 Москва*

Рассмотрены результаты измерений чувствительности ВВ к удару и трению по 12 основным отечественным и зарубежным методам. Получены вполне определенные корреляции между частотой взрывов в приборах N 1 и N 2 с «нижним пределом чувствительности» по ГОСТ 4545-88 и «критическим давлением прижатия» на приборе И-6-2. Практически все рассмотренные результаты хорошо коррелируют с величиной критического напряжения p_1 , которая представляет собой таким образом основу для объяснения результатов опытов при ударе и трении. Во многих случаях величины, полученные при определении чувствительности к трению, оказываются пропорциональными p_1 в степени, близкой к двум. Даны объяснения полученным закономерностям.

Определение чувствительности взрывчатых веществ (ВВ) к удару и трению — наиболее распространенный способ оценки опасности обращения с ними. Разнообразие условий, при которых возможно возникновение взрыва на практике, породило множество методов экспериментального измерения чувствительности. Некоторые из них введены в региональные или международные стандарты, другие остались только в практике отдельных лабораторий или сохранились лишь в виде набора данных в статьях и отчетах. До сих пор обобщения этого весьма разнородного материала не приведено.

В данной работе предпринята попытка такого обобщения. Речь пойдет в основном о методах испытания твердых ВВ (порошкообразных, кристаллических, измельченных породах). Пластичные ВВ (динамиты, пластиты, акваниты) или содержащие жидкие компоненты порошки (детониты, победиты) будут рассмотрены в рамках методов, общих для испытания твердых ВВ. Поскольку методов много, не все из них общеизвестны и, к тому же, некоторые со временем видоизменялись, в первой части работы вместе с наложением результатов дается краткое описание методик их получения.

Краткое описание методов испытаний, результаты опытов

Данные для стандартных образцов отечественных промышленных ВВ собраны в табл. 1, составленной по результатам исследований [1]. К данным [1] добавлены некоторые дополнительные сведения о свойствах рассматриваемых промышленных ВВ из [2], где также приведены их составы.

В табл. 1 даны пять характеристик чувствительности: H_0 — нижний предел чувствительности — максимальная высота падения груза массой 10 кг, при которой происходит не более одного взрыва в 25 опытах в приборе N 2 по [3]. Применяются копры Козлова (К-44-II) или Каста [4]. Испытуемое вещество помещается между торцами роликов диаметром 10 мм

Таблица 1

Результаты испытаний по методам, рассмотренным в работе [1]

ВВ	H_0 , см (прибор N 2)	f_2 , %	f_1 , %	f_6 , %	p_6 , МПа
1. Азид свинца	< 3	100	—	—	3,5
2. ТНРС	—	—	—	—	3,5
3. Тэн	5	—	100	100	31
4. Динамит 62 %	3	4	100	100	88,5
5. Гексоген	7	80	80	80	49
6. Детонит 15А-10	5	100	56; 48-80	—	215
7. Детонит М	7	100	52; 40-60	64	231
8. Победит ВП-4	10	36	32	88	175
9. Победит ВП-3	—	—	—	48	—
10. Пластит 43М	7	0	100	76	175
11. Аммонит СК-1-ЖВ	10	52	40	80	120
12. Гексамон N 1	—	—	40-60	84	—
13. Тетрил	10-15	24	44; 44-50	64	65-95
14. Аммонал ВА-4	13	28	24; 16-20	12	195
15. Гексонит 3	—	—	—	48	—
16. Алюмотол	50	0	44	84	210
17. ТНТ кристаллический	—	—	—	—	120
18. ТНТ чешуированный	50	0	4	20	230
19. ТНТ измельченный	50	0	28	24	190
20. Аммонит 6ЖВ	50	0	20; 16-30	24	250
21. Аммонит ПЖВ-20	25	12	12	28	215
22. Граммонит 79/21	50	0	4	48	250
23. Акванит № 2	40	8	40; 25-30	0	180
24. Акватол 65/35	50	—	16-29	0	200
25. Акванит № 3	50	—	—	0	300
26. Аммиачная селитра	50	—	—	0-4	300
27. Октоген	7	100	—	—	—
28. Пироксилин	3	100	—	—	—
29. Перхлорат аммония	10-13	56-100	—	—	—
30. ТГ 20/80	20	12	—	—	—
31. Тэн/парафин 95/5	7	40	—	—	—

в виде таблетки массой 0,1 г, полученной прессованием порошка давлением до 0,3 ГПа (грубодисперсные ВВ предварительно измельчаются). Точность определения — 3 см при $H_0 < 20$ см и 5 см при $H_0 > 20$ см. Если при $H = 50$ см не наблюдается ни одного взрыва, считается, что $H_0 = 50$ см.

Величины f_1 и f_2 — это частоты взрывов по 25 опытам в приборах N 1 и 2 соответственно. Масса груза 10 кг, высота падения 25 см, масса ВВ 0,05 г (без предварительной подпрессовки). В отличие от действующего в настоящее время ГОСТ 4545-88, где за взрыв принимают «явления, сопровождающиеся звуковым эффектом или пламенем», в работе [1] в соответствии с ГОСТ 4545-48 «взрывом» считали также образование дыма или огуливание ВВ. Указывается, что определение f_1 рекомендуется в тех случаях, когда в приборе N 2 испытания дают небольшую ($f_2 < 50\%$) частоту взрывов и большую (> 30 см) величину H_0 .

f_6 — частота взрывов на копре БК-6 (большой копер НИИ-6). Масса груза 24 кг, высота падения 2 м, 25 опытов. Испытуемое вещество массой 3 г неуплотненное в виде рыхлой таблетки диаметром 20 мм помещается на наковальню копра между двумя стальными дисками диаметром 41 и

толщиной 10 мм. Различают четыре типа взрывного превращения: 1) детонация (сильный звук, деформация диска), 2) взрыв (сильный звук, отсутствие остатков ВВ, диск не деформируется), 3) неполный взрыв (звуковой эффект, имеются остатки ВВ), 4) частичное разложение без звукового эффекта. Вещества, приведенные в табл. 1, характеризуются в основном взрывным превращением третьего типа. Для тэна, гексогена и динамита наблюдаются взрывные превращения типа 2, для аммиачной селитры — типа 4.

p_6 — предельное давление, при котором еще не возникает взрыва в 10 опытах при испытании на приборе И-6-2: навеска ВВ (0,03 г) зажата с помощью гидравлической системы между торцами двух стальных пуансонов диаметром 10 мм, один из которых (верхний) приводится во вращение со скоростью 9 1/с и вращается 3 с. Поскольку ни одно из применяемых в промышленности вторичных ВВ при таком испытании даже при наибольшем (0,3 ГПа) давлении не взрывается (взрываются только инициирующие и мощные бризантные ВВ), в табл. 1 приведены только результаты опытов, в которых ВВ испытывали с добавлением небольшого количества (0,01 г) кварцевого песка. Интересно, что в опытах без добавления песка значения p_6 для азид свинца и ТНРС очень сильно различаются (3,5 и 95 МПа соответственно), тогда как с песком совершенно одинаковы и равны 3,5 МПа.

Таблица 2
Результаты испытаний по методам
3 (b) (I), 3 (a) (II) и 3 (a) (III)

ВВ	F, Н	E, Дж	ПНЧ
Азид свинца	10	2,5	30
Гремучая ртуть	10	1	—
Перхлорат гидразина	10	2	—
Динамит	—	2-3	15
Маннитгексанитрат	—	1	—
Эритриттетранитрат	30	2	—
Тэн	60	3	50
Тэн/лактоза 85/15	60	3	—
Тэн/воск 95/5	60	3	—
Тэн/воск 93/7	80	5	—
Тэн/воск 90/10	120	4	90
Тэн/вода 75/25	160	5	—
Октоген	80	—	60
Гексоген	120	5	80
Тетрил	—	4	90
Состав В	—	7,5	—
Октол 70/30	240	—	—
Гексоген/алюминий 70/30	—	10	—
Гексоген/вода 74/26	—	30	—
Гексанитростильбен	240	—	—
Нитроцеллюлоза	240	—	—
Пикриновая кислота	360	—	—
Тротил	360	—	140
m-Динитробензол	—	—	> 200
Нитрат гуанидина	—	—	> 200

Естественно, что результаты этих опытов зависят от малых изменений в методике их проведения. Для иллюстрации этого данные [1] дополнены в табл. 1 сведениями, взятыми из других источников. Однако при дальнейшей обработке будут рассматриваться только результаты [1], как наиболее однородные по происхождению.

В табл. 2, 3 даны результаты испытаний, приведенные в «Рекомендациях комиссии экспертов ООН по транспортировке опасных грузов» [5]. В [5] имеются описания восьми методов. По трем из них результатов для надежного анализа мало. Рассмотрим параметры, приведенные в табл. 2, 3 для остальных пяти методов.

ПНЧ (метод 3 (a) (III), табл. 2) — «показатель нечувствительности» ВВ. Копер Роттера (Англия). Масса груза

5 кг. Образец ВВ объемом 0,03 мл помещается в латунном колпачке в гер-

метизированный прибор, соединенный с газовой бюреткой объемом 50 см³. Выступ стальной наковальни снизу вводится в колпачок, а ударник прижимается к колпачку сверху. Взрывом считается результат опыта, при котором изменение объема газа в бюретке составляет не менее 1 мл и появляется дым либо наблюдается быстрое неравномерное движение жидкости в манометре. Определяется высота падения груза H_1 , при которой взрыв происходит с частотой 50 % (метод «вверх — вниз»). Величина ПНЧ = $80H_1/H_2$, где H_2 — высота падения груза, при которой происходит 50 % взрывов для стандартного образца гексогена.

F (метод 3 (b) (I), табл. 2) — «усилие прижатия». Испытание проводится на фрикционном приборе ВАМ (Bundesanstalt für Materialprüfung, ФРГ): неподвижный фарфоровый ролик диаметром 10 мм с закругленными торцами с помощью груза и рычага прижимается к поверхности фарфоровой неглазурованной пластинки, где находится слой ВВ объемом 10 мм³. Пластинка совершает одно возвратно-поступательное движение на расстоянии 10 мм. F — это наименьшая нагрузка на ролик, при которой в шести опытах получается хотя бы один взрыв.

E (метод 3 (a) (II), табл. 2) — критическая энергия, при которой в шести испытаниях происходит один взрыв. Используется вертикальный копер ВАМ. Грузы массой 1, 5 и 10 кг. Объем образца ВВ 40 мм³. Прибор типа N 1 с фасками, диаметр роликов 10 мм, наружный диаметр муфты 16 мм, зазор между роликом и муфтой 4–8 мкм.

H_{12} (метод 3 (a) (V), табл. 3) — высота падения груза. При H_{12} по методу «вверх — вниз» происходит 50 % взрывов в приборе типа 12 Брустонского испытательного центра Горного бюро США. Брустонский копер с грузами массой $M_1 = 1,5, 2$ и $2,5$ кг и ударником с $M_2 = 1,5, 2$ и $2,5$ кг. Кроме необычно массивного ударника, этот копер отличается большим диаметром (32 мм) носка ударника и наковальни и применением для интенсификации разогрева наждачной бумаги. Навеска ВВ 30 кг помещается на лист ультратонкой наждачной бумаги размером 25×25 мм. Очень чувствительные ВВ иногда помещают непосредственно на наковальню. Нижняя поверхность ударника аккуратно прижимается к поверхности навески ВВ. Обычная процедура обозначается как M2525 sp: $M_1 = 2,5$ кг, $M_2 = 2,5$ кг, наждачная бумага (sand paper — sp). Взрывом считают результат, когда взрывное превращение охватывает не менее 50 % ВВ (способ фиксации доли разложения не указан; раньше для этой цели применяли шумомер [6]).

КЧТ (метод 3 (b) (II), табл. 3) — коэффициент чувствительности к трению на роторном приборе. Брусок из мягкой стали с поверхностью, обработанной до шероховатости $3,2 \pm 0,4$ мкм, прижимается с помощью пневматического устройства к ободу стального колеса диаметром 70 и шириной 10 мм. Испытуемое вещество помещается на брусок слоем толщиной не более 0,1 мм. Колесо приводится в движение маховиком с имеющимся на нем выступом, который цепляется за подвижный, выдвигаемый с помощью соленоида зуб ротора, находящегося на одной оси с колесом.

Таблица 3
Результаты испытаний по методам
3 (a) (V) и 3 (b) (II)

ВВ	H_{12} , см	КЧТ
Азид свинца	8,5	0,84
ТНРС	3,5	—
Тэн	5,0	—
Гексоген	12,1	3,4
Тэн/воск 90/10	—	4,0
Тетрил	13	4,5
Черный порох	20,1	—
Тротил	24,8	5,8
Бездымный порох	25,2	—
Нитрокрахмал	63	—

Таблица 4

Результаты испытаний по нескольким отечественным методам

ВВ	p_1 ,	p_2 ,	$p_3(0)$,	p_4 ,	W_* ,	f_1 ,	f_2 ,	H_0 ,	p_6^{**}
	кбар	кбар	кбар	кбар	Дж	%	%	см	
Азид свинца	2,6	1,7	—	—	—	—	100	< 3	—
Тэн	4,8	5,3	1,7	—	—	72	100	5	—
Октоген	6,5	6,6	2,2	7,0	19	96	100	7	2,2
Гексоген	7,0	7,0	2,4	7,0	20	64	68-88	7	2,8
Тетрил	8,4	7,2	3	—	—	48	16	10	2,5-3,0
Перхлорат аммония	8,5	—	—	—	—	52-100	56-100	10-13	—
Октоген/вода 90/10	8,5	—	—	8,2	25	—	—	—	—
Октоген/вода 80/20	—	—	—	9,0	40	—	—	—	—
Тротил	11	—	6,6	—	—	20	4	> 50	> 3
Аммиачная селитра	> 14	—	—	—	—	—	—	—	—
ТГ 50/50	—	—	—	—	—	48	—	—	—
ТГ 20/80	—	—	—	—	—	—	12	20	—
ПХА/ПММА 80/20	5,1	—	—	—	—	—	—	—	—
ПХА(4)/связка*	—	—	—	11	50	—	—	—	—
70/30	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ПХА(4)/связка 80/20	—	—	—	7,5	20	—	—	—	—
ПХА(240)/связка 80/20	—	—	—	5,2	8	—	—	—	—
Тэн/воск 95/5	—	—	—	—	—	—	40	7	—
Тэн/вода 95/5	—	—	2,6	—	—	—	—	—	—
Гремучая ртуть	—	2,0	—	—	—	—	—	—	—
Черный порох	—	—	—	—	—	52	—	—	—

* Связка СКД КТР, в скобках указан размер частиц ПХА в микрометрах.

** Без песка.

Колесо поворачивается на 60° , после чего зуб убирается, ротор и колесо останавливаются. Обычная нагрузка на ВВ 55 кгс. Измеряемая величина — скорость V_2 , при которой происходит 50 % взрывов. Используется метод «вверх — вниз», $KЧТ=3V_2/V_1$; где при скорости V_1 наблюдается 50 % взрывов для стандартного образца гексогена.

В табл. 4 приведены результаты испытаний по методам, разработанным в нашей стране и рассмотренным в работе [7], где p_1 — критическое напряжение — наименьшее давление, при котором возникает взрыв ВВ при ударе на копре К-44-II при первом разрушении таблетки ВВ; p_2 — критическое давление инициирования взрыва при разрушении цилиндрической оболочки, в которой находится ВВ; $p_3(50)$ — давление, при котором наблюдается 50 % взрывов при испытании на копре К-44-III; при давлении $p_3(0)$ на копре К-44-III отмечается не более одного взрыва в 25 опытах; $p_4 = (4/\pi d^2)\sqrt{K_M W_*}$ — критическое давление инициирования взрыва на копре К-44-II. Здесь W_* — критическая энергия инициирования по [7] определяется как минимальная энергия удара, при которой возникает 50 % взрывов при некоторой критической толщине таблетки ВВ h_* ; d — диаметр роликов; коэффициент K_M характеризует механическую жесткость системы нагружения.

Основные из рассматриваемых в данной работе методики схематически представлены на рис. 1, где указаны показатели чувствительности, определяемые данными приспособлениями.

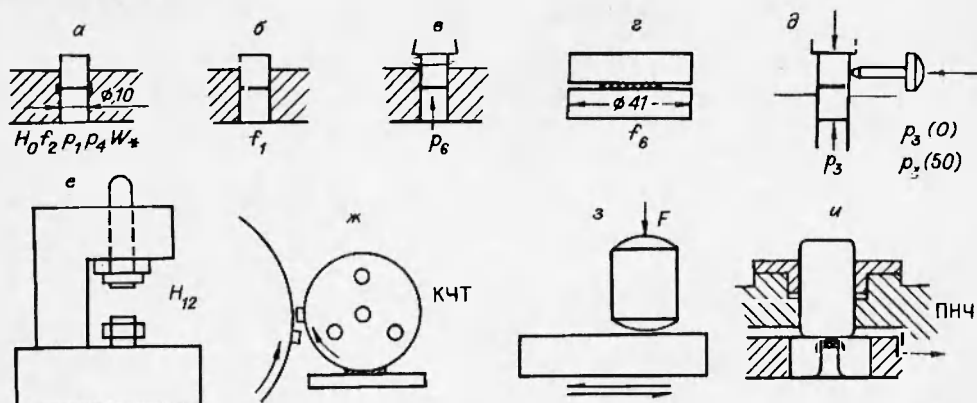


Рис. 1. Схемы основных методов испытания:

а — прибор N 2 по ГОСТ 4545-80; б — прибор N 1 по ГОСТ 4545-80; в — прибор И-6-2; з — ударное приспособление копра БК-6; д — К-44-III; е — брусонский копер, прибор N 12 (метод 3 (а) (V)); ж — прибор для определения чувствительности к трению (метод 3 (б) (II)); з — фрикционный прибор ВАМ (метод 3 (б) (I)); и — ударное приспособление копра Роттера (метод 3 (а) (III)), стрелкой показан выход газов к манометру.

Сравнение результатов испытания, полученных разными методами

Принято считать, что результаты определения чувствительности ВВ разными методами имеют друг с другом мало общего. Как иногда полагают, именно это и позволяет получать всестороннюю информацию о степени опасности ВВ. В ряде работ тем не менее предпринимались попытки обнаружить взаимосвязь между результатами испытаний по разным методикам. Наиболее известна из них работа [8], где обнаружена линейная связь между чувствительностью ВВ к трению на копре К-44-III ($p_3(50)$ и $p_3(100)$) и величиной критического напряжения p_1 , измеренной на копре К-44-II. Линейная связь между H_0 и p_1 отмечена в [7]. Зарубежные методы испытаний, а также величины f_1, f_2, p_6 и т. п. в этом плане пока не рассматривались.

Задача данного исследования состоит в том, чтобы попытаться найти в приведенной выше информации моменты, объединяющие по возможности все или значительную часть рассматриваемых методик, установив между ними наиболее простые количественные связи.

Естественно начать с работы [1], выполненной в 60-е годы, когда еще действовал ГОСТ 4545-48. В его основе лежало определение частоты взрывов в приборе N 1 при ударе грузом массой 10 кг с высоты 25 см («русская проба»). Уже тогда было ясно [9], что без дополнительного исследования влияния навески, зазора между роликом и муфтой, состояния поверхностей роликов, используя в качестве стандартного ВВ тетрил, а в качестве единственного измерительного устройства прибор N 1, получить надежные результаты по чувствительности ВВ невозможно.

Цель работы [1] заключалась в развитии и совершенствовании этой методики. Работа завершилась введением в практику промышленных испытаний ВВ прибора N 2, а в качестве основной характеристики чувствительности — величины H_0 , предложено также применять как стандартный прибор большой копер (БК-6).

Можно показать, что выполненные в [1] определения связаны между собой. Для величин H_0, f_1 и f_2 эта связь в какой-то мере следует и непосредственно из табл. 1, хотя разброс результатов слишком большой.

Однако, если сопоставить, в некотором противоречии с конкретными рекомендациями, сделанными в [1], приведенные в ней данные в координатах $H_0, f_{1,2}$, используя при высокой ($> 60\%$) частоте взрывов только наибольшие из значений f_1 или f_2 , а при $< 60\%$ — наименьшие, зависимость $f(H_0)$ получается вполне определенной (рис. 2). Видна четкая связь между весьма сложными по своей природе и внешне совсем неоднородными величинами.

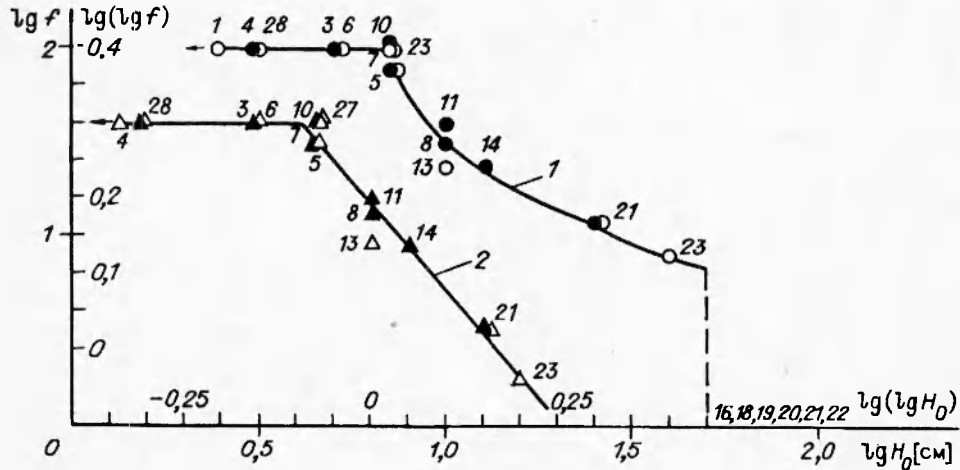


Рис. 2. Связь частоты взрывов в приборах N 1 и N 2 с нижним пределом чувствительности (при $f > 60\%$ нанесены только большие значения f_1 или f_2 , при $f < 60\%$ — только меньшие из них).

Координаты: 1 — $\lg H_0, \lg f$, 2 — $\lg(\lg H_0), \lg(\lg f)$ (номера точек см. в табл. 1); темные точки — прибор N 1, светлые — прибор N 2.

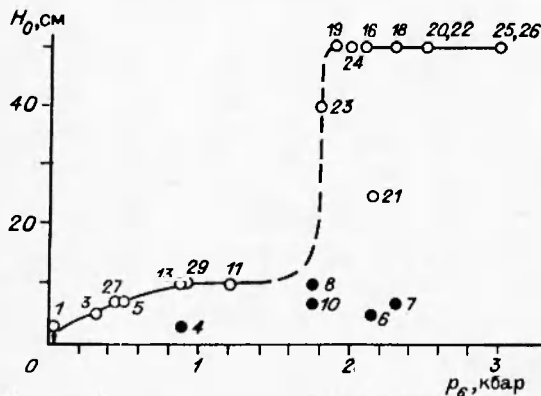


Рис. 3. Связь нижнего предела чувствительности с критическим давлением p_0 (номера точек см. в табл. 1).

● — ВВ, содержащие жидкие компоненты.

При $H_0 < 7$ см для всех ВВ $F = 100\%$. Затем в координатах $\lg H_0, \lg f$ она плавно уменьшается. В координатах $\lg(\lg H_0), \lg(\lg f)$ на этом участке получается прямая: $\lg(\lg f) = 0,19 - 1,17 \lg(\lg H_0)$. Обрыв зависимости $f(H_0)$ при $H_0 = 50$ см также, как и при $f = 100\%$, связан с особенностями методики: при $H_0 > 50$ см измерения не проводятся, а при $f > 100\%$ их и нельзя провести, если не уменьшать энергию удара, что потребовало бы дополнительного изучения влияния

на частоту взрывов массы груза или высоты его падения.

Определенной зависимости $f_6(H_0)$ в сущности нет. Имеется лишь некоторая тенденция к уменьшению f_6 при увеличении H_0 . Очевидно, большой копер в этом варианте — слишком грубый прибор для количественного определения чувствительности ВВ.

Связь между H_0 и p_6 (рис. 3), напротив, вполне определенная. Если не рассматривать пять точек для ВВ, содержащих жидкие нитроэфир, кривая $H_0(p_6)$ плавно поднимается от азид свинца (точка 1) до аммонита

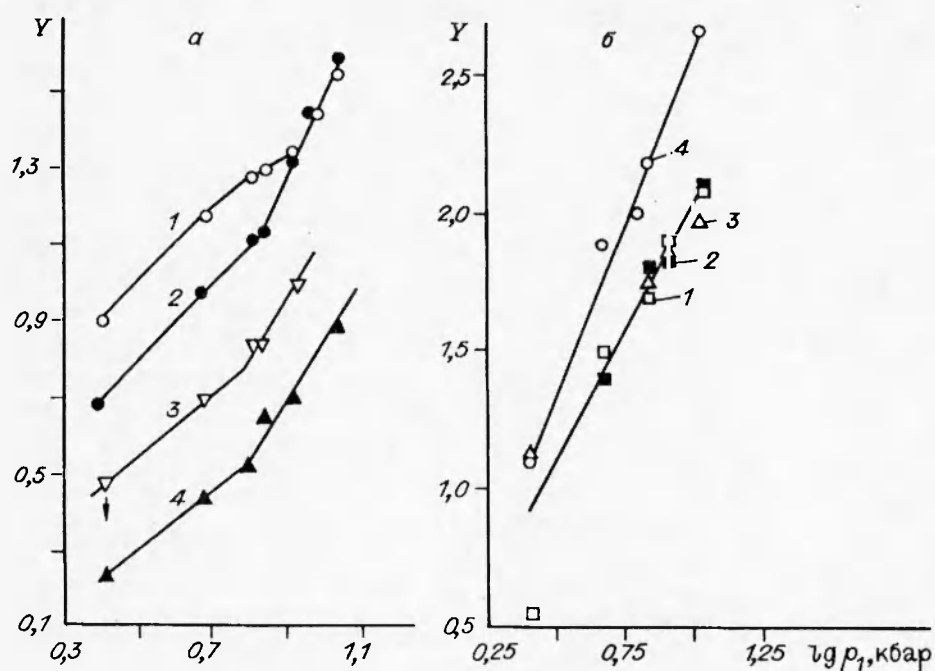


Рис. 4. Связь с критическим напряжением p_1 рассматриваемых величин:
 а: 1 — $p_3(50)$ (кбар), 2 — $p_3(0)$ (кбар), 3 — H_0 (см), 4 — ПНЧ, $Y = \lg [5p_3(50); 8,72p_3(0); H_0; \text{ПНЧ}/17,8]$; б: 1 — p_6 , 2 — H_{12} , 3 — КЧТ, 4 — F , $Y = \lg [p_6; 5,2H_{12}; 16 \text{ КЧТ}; F/1,26]$.

СК-1-ЖВ (точка 11) и затем резко устремляется вверх. Отсюда следует, что параметр H_0 пригоден только для характеристики опасных веществ и то (ввиду относительно малого диапазона изменения H_0) довольно грубой: от точки 1 до точки 11 H_0 меняется в 3 раза, а p_6 — в 34. В то же время рис. 3 показывает, что прибор И-6-2 дает ошибочное представление о степени опасности ВВ, содержащих жидкие нитроэфирсы. Очевидно, малая добавка кварцевого песка не позволяет повысить коэффициент трения порошка со смазкой до величины, необходимой для выявления реальной степени опасности ВВ.

Аммонит ПЖВ-20 (16 % ТНТ, 64 % аммиачной селитры, 20 % NaCl, рис. 3, точка 21) обнаруживает повышенную чувствительность по величине H_0 , очевидно, связанную с наличием в его составе хлорида натрия. Считают, что NaCl, несмотря на высокую (801 °C) температуру плавления, не увеличивает чувствительности ВВ. Авторы [10] связывают это с высокой теплопроводностью NaCl. Оказывается, что метод определения H_0 позволяет проявить сенсibiliзирующее действие NaCl, хотя при испытании по методу И-6-2 (очевидно, песок — более сильный сенсibiliзатор), а также и в практических условиях, имея в виду большой опыт производства и применения этого аммонита, присутствие NaCl на его чувствительности не сказывается.

Одной из основных величин в теории возбуждения взрыва ударом считается критическое давление инициирования p_1 . Значения p_2 и p_4 близки к p_1 и по величине и по происхождению. В координатах p_1 , (p_2, p_4) точки лежат вблизи прямой, проходящей через начало координат, с наклоном 45°. Как уже упоминалось, считается [8], что значения p_3 также пропорциональны p_1 . Рис. 4 показывает, однако, что этот вывод справедлив лишь частично и в очень грубом приближении. Точки $p_3(p_1)$ на рис. 4 — средние величины по данным [4, 7, 8, 11]. Здесь зависимости вида $\lg p_3 = a + n \lg p_1$ дают $n = 1$ только для двух-трех первых точек: азид

свинца, тэн, октоген. Для остальных ВВ опорного ряда получается $n \approx 2$. Аналогичная картина наблюдается также для связей $H_0(p_1)$ и ПНЧ(p_1). Величина F также связана с p_1 . В координатах $\lg p_1, \lg F$ получается прямая $\lg F = -0,02 + 2,48 \lg p_1$.

На рис. 4 в виде функций p_1 даны также значения КЧТ, p_6 и H_{12} . Для них угловой коэффициент прямой $n = 1,84$.

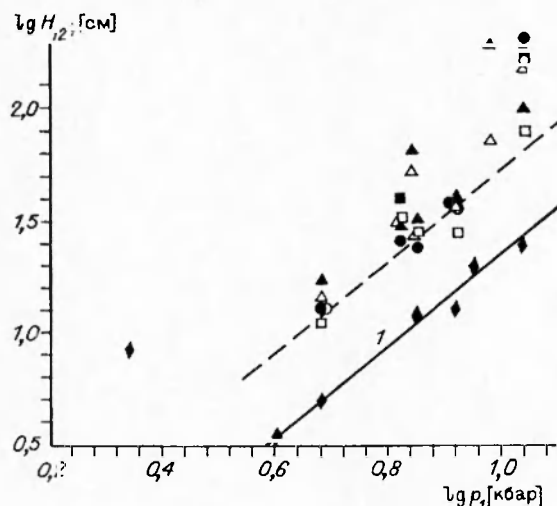


Рис. 5. Значения H_{12} , полученные в работах [5, 6, 12, 13]. Сплошная линия проведена по данным [5] (в [13] приведены результаты четырех серий испытаний с прибором типа 12).

Величина H_{12} совершенно неожиданным образом (она используется во многих работах для самых разных корреляций) оказывается не очень надежной. На рис. 5 приведены данные из работ [6, 12, 13], полученные на разных модификациях прибора N 12. Разброс результатов весьма велик. Все более старые данные (использующиеся для корреляций) располагаются значительно выше прямой 1, проведенной по данным табл. 3, взятым из [5].

Величина E , как видно из табл. 2, дает очень грубое описание чувствительности ВВ. При попытке построить ее в виде функции p_1 получается очень большой разброс данных.

Обсуждение результатов

Соотношения между результатами испытаний могут быть использованы, с одной стороны, для выяснения особенностей возбуждения взрыва при ударе и трении при соответствующих условиях инициирования, а с другой — для обоснованного выбора комплекса методов и критериев опасности ВВ при механических воздействиях.

Основной результат, полученный в настоящей работе, состоит в том, что в ней впервые удалось связать друг с другом двенадцать практически, казалось бы, совершенно разнородных величин, получаемых при определении чувствительности ВВ. Сделано это преимущественно (хотя не только — см. рис. 2, 3) для ВВ опорного ряда — азид свинца, тэн, гексоген, октоген, тетрил, пикриновая кислота, тротил. В целом картина довольно определенная: все хорошо отработанные, многократно проверенные методики дают результаты по существу сходные друг с другом.

Известно, что чувствительность ВВ к механическим воздействиям определяется двумя наборами свойств: механическими характеристиками, по-разному проявляющимися в разных условиях воздействия, и термокинетическими параметрами с условиями механического воздействия, связанными гораздо слабее [14]. Можно полагать, что хорошо отшлифованная методика испытания, основанная на большом практическом опыте, на интуиции исследователя, автоматически уделяет основное внимание термокинетической чувствительности, отодвигая механическую на второй план или удаляя ее совсем. Этому способствует применение сенсibiliза-

торов (песок, наждачная бумага, неглазурованные фарфоровые поверхности, пластинки с насечкой, колпачки из мягкого металла).

При рассмотрении механизма инициирования особого внимания заслуживает величина «критического напряжения» p_1 , с которой так или иначе связаны почти все остальные из рассматриваемых здесь показателей чувствительности ВВ. Имеются два различных подхода к объяснению критических напряжений. В работе [15] предполагается, что p_1 — это давление, при котором запас тепла в очаге, возникшем в результате воспламенения малого количества вещества, оказывается достаточным для инициирования стационарного горения находящегося между торцами роликов слоя ВВ.

Результаты расчета для четырех основных бризантных ВВ опорного ряда (тэн, гексоген, тетрил, тротил) согласуются с опытом с точностью до коэффициента $0,7 \pm 0,1$.

Метод предложен в работе [16]. В ней используется идея о том, что температура разогрева ВВ при ударе ограничена температурой плавления при давлении, развивающемся в слое ВВ. При этом полагают, что давление в слое линейно растет от периферии к центру ролика.

Интегрируя функцию тепловыделения $\exp(-E/RT)T^{-2}$, интересную тем, что в отличие от обычной аррениусовской она интегрируется в квадратурах, автор работы [16], полагая $(T - T_n) \sim t$, получает соотношение

$$c_p(T_0 - T_n) = Qzt_0 \exp(-E/RT_0),$$

из которого следует, что количество тепла, выделившееся в результате химической реакции за время разрушения t_0 , равно тому, которое в результате диссипации механической энергии привело к линейному разогреву ВВ от T_n до T_0 . Получается замкнутая система уравнений, откуда легко определить p_1 .

Подходы [15, 16], представляющие собой существенный вклад в теорию инициирования взрыва ударом, характеризуют две основных стадии процесса инициирования: 1) возникновение очага разогрева и воспламенение, 2) распространение горения по заряду ВВ (что собственно и является результатом «механического инициирования»). Полученные данные об однозначной связи друг с другом самых различных методов испытаний свидетельствуют о том, что вторая стадия, по-видимому, более важна. Именно она определяет величину механической чувствительности в том смысле, как ее понимают в технике, и к чему стремятся при разработке методики, отвечающей опыту, практики.

Действительно, размер первоначального очага в модели [15] $r_0 \sim \sqrt{\lambda t_0} \sim \sqrt{10^{-3} \cdot 10^{-5}} = 10^{-4}$ см = 1 мкм — микроскопический. Чтобы квалифицировать явление как взрыв, следует увеличить его (этот размер) на два-три порядка величины и, следовательно, отдать предпочтение процессу распространения.

Линейная связь между p_1 , p_2 и p_4 неудивительна. Это практически одна и та же величина. Для большинства из остальных рассматриваемых здесь показателей чувствительности (p_6 , F , W_* , H_{12} , на значительных участках — $p_3(0)$ и $p_3(50)$) зависимость функции от p_1 квадратичная. Близки к квадратичной и зависимости от p_1 величины ПНЧ и КЧТ. Если для W_* , H_{12} и ПНЧ это не вызывает удивления (все они представляют собой в том или ином масштабе энергию удара, а последняя пропорциональна квадрату давления), то для p_3 , p_6 , F , КЧТ требуется специальное объяснение. Оно включает детальный анализ механизма деформации, разрушения и разогрева ВВ в каждом из этих приборов, и требует отдельного рассмотрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Маурина Н. Д., Федосова Н. А., Рязанская В. С.** Методы и результаты изучения чувствительности промышленных ВВ к механическим воздействиям // Взрывное дело: Сб. ст. / Научн.-техн. горн. о-во. 1970. № 68/25. С. 158-168.
2. **Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И.** Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1973.
3. **Холево Н. А.** К вопросу о возбуждении взрыва при деформации заряда взрывчатого вещества (ВВ) // Физика взрыва: Сб. ст. / АН СССР. Физ.-хим. ин-т. 1955. № 3. С. 16-32.
4. **Андреев К. К., Беляев А. Ф.** Теория взрывчатых веществ. М.: Оборонгиз, 1960.
5. **Рекомендации по перевозке опасных грузов. Испытания и критерии.** Нью-Йорк: ООН, 1987.
6. **Wenograd J.** The behavior of explosives at very high temperatures // Trans. Faraday Soc. 1961. V. 57, N 9. P. 1612-1620.
7. **Дубовик А. В.** Методология чувствительности ВВ к механическим воздействиям // Взрывчатые материалы и пиротехника: Сб. ст. / ЦНИИТИКПК. 1994. Вып. 5.
8. **Афанасьев Г. Т., Боболев В. К.** Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.
9. **Кондриков Б. Н.** О некоторых методах определения чувствительности ВВ к удару // Взрывное дело: Сб. ст. / Науч.-техн. горн. о-во. № 68/25. С. 168-173.
10. **Боуден Ф. П., Иоффе А. Д.** Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М.: Изд-во иностр. лит., 1952.
11. **Прибор и метод определения чувствительности КК к трению.** Куйбышев, 1954.
12. **Камлет М.** Связь между чувствительностью к удару и структурой полинитроалифатических органических взрывчатых веществ // Детонация и взрывчатые вещества: Сб. ст. М.: Мир, 1981. С. 142-159.
13. **Dobratz V. M.** LLNL Explosives Handbook. Livermore, 1981. (Lawrence Livermore Nat. Lab; UCRL-52997).
14. **Андреев К. К.** О некоторых зарубежных исследованиях по методике экспериментального определения чувствительности ВВ к удару // Теория взрывчатых веществ: Сб. ст. М.: Оборонгиз, 1963. С. 94-130.
15. **Амосов А. П.** Об условии распространения горения за пределы очага воспламенения // Докл. АН СССР. 1978. Т. 243, № 3. С. 673-676.
16. **Дубовик А. В.** Расчет показателей чувствительности твердых ВВ к удару // Докл. АН СССР. 1986. Т. 286. № 2. С. 377-380.

*Поступила в редакцию 26/V 1994 г.,
в окончательном варианте — 15/IX 1994 г.*