

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ДЕТОНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ВОДОСОДЕРЖАЩИХ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ

А. В. Дубовик, А. В. Аполенис, В. Э. Анников, Е. И. Алешкина

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 125047 Москва
a-dubovik@mail.ru

Выполнены исследования чувствительности к удару и детонационной способности водосодержащих взрывчатых составов на основе мощных взрывчатых веществ гексогена и октогена. Установлена связь между параметрами, характеризующими соответствующие типы взрывных испытаний. Найдены рецептуры составов с приемлемыми для практики показателями чувствительности, мощности и детонационной способности.

Ключевые слова: взрывчатый состав, чувствительность к удару, детонационная способность.

В последнее время появились сообщения [1] о разработке малочувствительных водосодержащих взрывчатых составов (ВВС) с большим (до 95 %) содержанием мощных взрывчатых веществ (ВВ) гексогена и октогена. Эти данные получены по результатам стандартных испытаний на чувствительность к удару, проведенных по ГОСТ 4545-88, в которых не было зарегистрировано ни одного взрыва в приборе № 1 при содержании водного или водно-гликолевого раствора окислителя (аммиачной селитры) больше 5 %. Однако появившееся затем сообщение о серьезной аварии с аналогичным составом заставило нас внимательно заняться решением проблемы взрывоопасности ВВС. С этой целью были проведены исследования чувствительности и детонационной способности модельных составов на основе мощных ВВ с гелеобразным водным и водоэмульсионным растворами окислителей — аммиачной и натриевой селитры, по результатам которых сделаны выводы об их реальной взрывоопасности. Составы приведены в табл. 1. Взрывчатые характеристики ВВС на основе А-IX-2 (прессованный гексоген с добавкой 5–6 % парафина) представлены в табл. 2.

Выбор структурирующей жидкой среды в составе ВВС вместо простого водного раствора связан с тем, что последний легко удаляется (испаряется, отжимается) из заряда ВВС при его разгерметизации, оголяя чувствительное ВВ, что и послужило причиной указанной выше аварии. С помощью структурирующих добавок удастся не только уменьшить текучесть жидкой среды, но и обеспечить ее связь с кристаллами ВВ, благодаря чему получаю-

Таблица 1
Состав гелеобразного раствора окислителей и эмульсионной матрицы

Компонент	Гелеобразный раствор*, %	Эмульсионная матрица, %
Нитрат аммония	50	78
Нитрат натрия	20	–
Вода	30	16
Полиакриламид	1**	–
Калий фосфорно-кислый	0.1**	–
Эмульгатор РЭМ	–	1.2
Эмульгатор И-12А	–	4.5

Примечания. *Плотность гелеобразного раствора 1.41 г/см³. **Сверх 100 %.

Таблица 2
Состав и взрывчатые характеристики ВВС на основе А-IX-2

Характеристики	Состав 1	Состав 2
А-IX-2	50	30
Гелеобразный раствор окислителей	50	70
Кислородный баланс, %	–18.2	–3.4
Плотность, кг/м ³	1 450	1 400
Скорость детонации, м/с	6 990	6 430
Теплота взрыва, кДж/кг	5 600	3 380

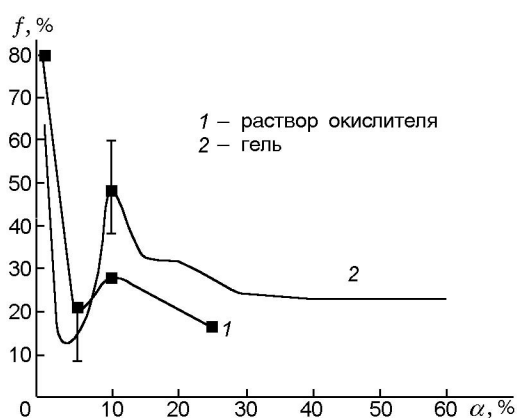


Рис. 1. Зависимость частоты взрывов ВВС на основе гексогена от содержания жидкого компонента

щийся заряд ВВС способен сохранять форму даже в отсутствие упаковки. Кроме того, умеренно вязкая среда выступает в роли флегматизатора ВВС при ударе [2], отводя избыточную энергию потенциальных очагов химической реакции благодаря большой подвижности в двухфазном потоке вещества.

Опыты по исследованию чувствительности ВВС к удару проводили на копре К-44-2 в приборе № 1 со стандартными навесками массой 0.05 г. Использовали груз массой 10 кг, который сбрасывался с высоты 25 см. Регистрировали зависимость частоты взрывов f от массового содержания жидкой фазы α (%) в заряде ВВС. Сначала были воспроизведены опыты [1] с ВВС на основе водного раствора окислителя. Полученная зависимость $f(\alpha)$ представлена на рис. 1.

Оказалось, что действительно с увеличением α от нуля до 5 % частота взрывов быстро уменьшается от 64 ÷ 80 % (гексоген) до 20 %, но не до нуля, как в [1]. Однако уже в диапазоне $5 < \alpha < 10$ % наблюдается ее увеличение до максимального значения 28 %, и далее с возрастанием α частота взрывов вновь снижается до 20 % при содержании жидкого окислителя 60 %. В опытах с гелеобразным раствором окислителей получены аналогичные результаты (см. рис. 1), за исключением того, что максимальное значение f при $\alpha = 10$ % составляет 60 %. Кривые $f(\alpha)$ для ВВС на основе октогена и продукта А-IX-2 (рис. 2 и 3) незначительно отличаются от рассмотренных выше зависимостей.

Таким образом, по результатам стандартных испытаний уровень чувствительности

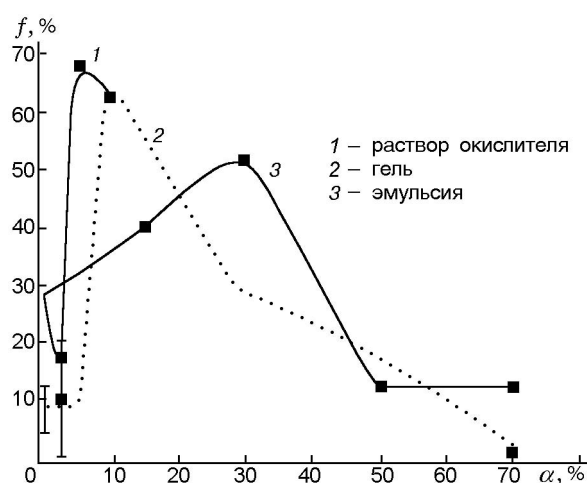


Рис. 2. Зависимость частоты взрывов ВВС на основе А-IX-2 от содержания жидкого компонента

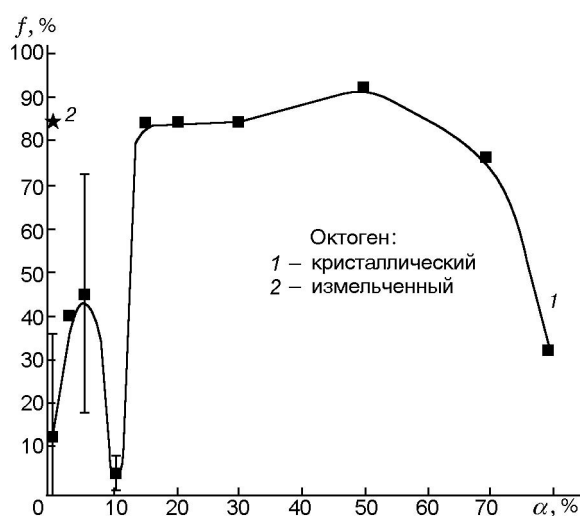


Рис. 3. Зависимость частоты взрывов ВВС на основе октогена от содержания гелеобразного раствора окислителей

ВВС в широком интервале значений α характеризуется не малой, а умеренно высокой величиной, сравнимой с уровнем чувствительности основного компонента. И только в узком диапазоне концентраций жидкого заполнителя вблизи значения $\alpha = 5$ % наблюдается пониженная чувствительность ВВС. Используя результаты качественного анализа диссипативных разогревов при течениях ВВ в различных участках прибора № 1, покажем на примере ВВС на основе гексогена, что наличие характерного минимума на кривой $f(\alpha)$ связано

не с низкой чувствительностью исследуемого состава, а обусловлено исключительно аппаратной особенностью получения частостей взрывов в стандартном методе испытаний ВВ на чувствительность к удару.

Действительно, чувствительность гексогена ($\alpha = 0$) к удару в приборе № 1 характеризуется частотой взрывов $f = 70 \pm 10$ %. Анализ экспериментальных данных показывает, что взрывы при ударе возникают под роликами прибора вблизи центра заряда, где максимальный разогрев ВВ составляет $\Delta T_0 \approx \sigma \varepsilon (D/h) / c_v$ (σ — прочность на сжатие, c_v — теплоемкость ВВ при постоянном объеме, D/h — отношение диаметра к толщине заряда, $\varepsilon = \Delta h/h$ — осевая деформация заряда при ударе). Выбирая характерные значения $\sigma/c_v \approx 50$ К и $D/h \approx 20$, находим, что достаточный для взрыва разогрев гексогена (400 К) реализуется при $\varepsilon = 0.4$. Сильнее заряд деформироваться не может, поскольку на входе в кольцевой зазор прибора № 1 действуют большие силы сопротивления радиальному потоку $p \sim \sigma L/H$ (L, H — длина и ширина зазора соответственно, $L/H \approx 100$).

Даже при малой доле жидкого компонента (5 %) прочность гексогена заметно (почти вдвое) снижается [2], но сопротивление на входе в зазор еще остается достаточно большим, несмотря на то, что деформация заряда при ударе в этом случае несколько возрастает. Поэтому механический разогрев $\Delta T_5 < \Delta T_0$, частота взрывов резко падает. При этом взрывы по-прежнему возникают в промежутке между торцами роликов прибора № 1.

С увеличением α до 10 % прочность заряда снижается сильно, но возрастает деформация сжатия и, самое главное, практически исчезает входное сопротивление в кольцевой зазор, куда устремляется растекающееся ВВ при ударе. Разогрев ВВС при течении в зазоре составляет $\Delta T_{10} \approx \lambda \mu v D / c_v H^2$ (μ — динамическая вязкость текучей среды, v — скорость нагружения заряда, λ — безразмерный коэффициент, учитывающий теплоотвод в ролики и муфту прибора). При $\lambda \mu v D / c_v H \approx 5$ К и $D/H \approx 100$ находим, что $\Delta T_{10} \approx \Delta T_0$, и поэтому вероятность взрыва ВВС ($\alpha = 10$ %) в зазоре сравнима с вероятностью взрыва гексогена ($\alpha = 0$) под роликами прибора № 1.

При $\alpha > 10$ % эффективная вязкость ВВС значительно снижается из-за уменьшения содержания дисперсной фазы и соответственно

снижается механический разогрев потока. Кроме того, заметно уменьшается калорийность ВВС. Поэтому наблюдается закономерное падение частостей взрывов до нуля при $\alpha \rightarrow 100$ %.

Итак, сложная структура течений в приборе № 1 не позволяет получить однозначные данные по чувствительности ВВС к удару. Наблюдаемый в эксперименте спад частостей взрывов при $\alpha = 5$ % не свидетельствует о снижении чувствительности ВВС в рассмотренном диапазоне содержаний жидкого компонента, а объясняется исключительно задержкой перехода «горячих» очагов взрыва из межроликового промежутка в кольцевой зазор прибора № 1.

В подтверждение сказанному приведем результаты опытов с ВВС, в котором маловязкий гель заменен высоковязкой эмульсионной матрицей (см. рис. 2). В этом случае минимум на зависимости $f(\alpha)$ сместился в сторону значений $\alpha = 50$ %, при которых исчезает эффект запирания потока на входе в зазор испытательного прибора. Заметим, что «консерватизму» чувствительности ВВС в данном случае также способствует то обстоятельство, что вязкий наполнитель играет роль сенсibilизатора взрыва, увеличивая время разрушения заряда при ударе [2]. Поэтому с учетом сказанного об испытаниях по стандарту для получения объективной информации о механической чувствительности ВВС, не связанной со сложной конструкцией испытательного прибора № 1, нами проведена дополнительная серия испытаний на удар по методу критических энергий с использованием прибора № 2 со свободным истечением вещества [3].

В отличие от стандарта в методе критических энергий удару подвергаются навески переменной массы (толщины h) и при фиксированном значении α регистрируется зависимость минимальной энергии удара, при которой получают все отказы или происходит не более одного взрыва в серии из 25 испытаний, от толщины заряда — $E(h)$. Как правило, на экспериментальной зависимости $E(h)$ имеется характерный минимум E_{cr} в точке h_{cr} , который принимается в качестве энергетической характеристики чувствительности ВВ к удару. Действительно, при всех $h < h_{cr}$ велико гидродинамическое сопротивление радиальному потоку ВВ ($p \approx \sigma D/h$), а при $h > h_{cr}$ энергия груза затрачивается на продолжительное вытес-

нение толстого слоя ВВ из-под роликов испытательного прибора, причем доля диссипируемой энергии при этом уменьшается пропорционально $\rho v^2(D/h)^2$ (ρ — плотность ВВ). Таким образом, при $h \neq h_{cr}$ энергия инициирования ВВ всегда больше E_{cr} , и поэтому при любой толщине образца при энергии удара $E < E_{cr}$ взрыва не происходит. Поделив E_{cr} на площадь ударника $\pi D^2/4$, получим удельную критическую энергию инициирования взрыва e_{cr} , которая хорошо коррелирует с критическим давлением возбуждения взрыва p_{cr} согласно соотношению $e_{cr} = Ap_{cr}^2$ ($A = 37.2$ Дж/(см²·ГПа²) для копра с механической жесткостью системы нагружения 0.21 ГН/м) [3].

На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость $E_{cr}(\alpha)$, полученная в опытах с ВВС на основе продукта А-IX-2 с гелеобразным наполнителем. Предварительно А-IX-2 измельчался в фарфоровой ступке до частиц размером 50 мкм. Кроме того, оказалось методически оправданным использовать вместо муфты прибора № 2 бумажную кальку, которой обматывали в два слоя боковую поверхность цилиндрических роликов. Она позволяла сохранять форму заряда при обращении с испытательной сборкой и практически не оказывала сопротивления радиальному потоку вещества при ударе.

Как видно из рис. 4, значения e_{cr} приблизительно линейно возрастают (при этом чувствительность ВВС уменьшается) с величиной α . Как и следовало ожидать, на зависимости $e_{cr}(\alpha)$ отсутствуют экстремумы, сви-

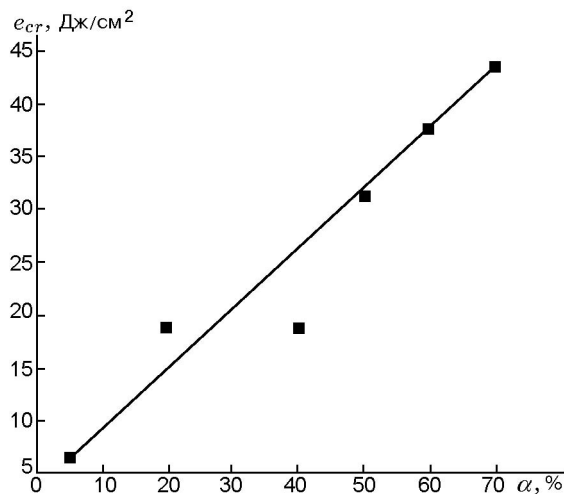


Рис. 4. Зависимость энергии инициирования от содержания геля в смеси

детельствующие о резком изменении чувствительности ВВС к удару. Физически это объясняется монотонным снижением прочности заряда с одновременным увеличением его пластичности (деформируемости) при ударе. Однако для окончательного решения вопроса о взрывоопасности рассматриваемых ВВС необходимо получить данные об их детонационной способности, поскольку только они в совокупности с данными по чувствительности к механическим воздействиям позволяют сделать обоснованные выводы о характере возбуждения и протекания взрывных процессов при обращении с ВВС, т. е. об их взрывоопасности в целом.

Критический диаметр детонации d_{cr} ВВС на основе А-IX-2 с гелеобразным наполнителем определялся на зарядах, помещенных в тонкостенные (0.5 мм) стеклянные оболочки. Заряды ВВС свободно упаковывались в трубки и инициировались с торца капсюлетдетонатором. Прохождение детонации фиксировалось скоростным фоторегистратором, а также контролировалось по характеру повреждения пластины-свидетеля. Полученные результаты экспериментов представлены в табл. 3 и на рис. 5.

Анализируя рис. 5, отметим монотонное увеличение d_{cr} с ростом α . Однако в отличие от рис. 4 возрастание этого взрывного параметра нелинейное: значения d_{cr} практически постоянны при $\alpha < 30$ %, но затем начинают быстро увеличиваться, так что при $\alpha = 50$ % детонационная способность ВВС сравнима с детонационной способностью большинства промышленных ВВ типа аммонита 6ЖВ [4, $d_{cr} = 10$ мм]. Наблюдаемое постоянство величины d_{cr} при малых значениях α может быть связано с хи-

Таблица 3
Зависимость показателей e_{cr} и d_{cr} от содержания жидкого наполнителя в составе А-IX-2

α , %	e_{cr} , Дж/см ²	d_{cr} , мм
0	5.00	4.2
5	6.2	4.2
20	18.7	5.0
40	18.7	6.3
50	31.2	10.1
60	37.5	13.4
70	43.7	>14

