

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ ВЗРЫВА УДАРОМ И ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ СМЕСЕЙ ОКИСЛИТЕЛЬ — ГОРЮЧЕЕ

*И. А. Карпунин, В. К. Боболев, Ю. М. Балинец,
Б. П. Степашкин, В. А. Теселкин*

(Москва)

При изучении чувствительности взрывчатых систем (ВС) к механическим воздействиям нередко приходится проводить исследование отдельных стадий возбуждения и развития взрыва, используя с этой целью различные методические приемы. В работах [1—3] показано, что комплекс испытаний, включающий дериватографический анализ закономерностей термического распада отдельных компонентов и простейших модельных смесей, тензометрический метод определения критических параметров возбуждения взрыва при механическом ударе [4], оптический метод исследования процесса развития взрыва при локальном инициировании [5] и изучение детонационной способности модельных взрывчатых композиций, позволяет получить важную информацию о поведении ВС на каждом из этапов взрывчатого превращения. Совместное рассмотрение полученных данных дает возможность в ряде случаев по поведению модельных систем оценить реальную взрывоопасность смесевых ВВ или смесевых твердых топлив и выявить детали механизма возбуждения или развития взрыва.

В настоящей работе обсуждаются некоторые особенности поведения систем ПХА с различными горючими компонентами при ударе на копре в приборе № 2 и в условиях распространения детонации на пределе.

Естественно, что возбуждение взрыва при ударе и распространение детонации в критических условиях отличны по своей физической природе. Тем не менее оба явления характеризуются одной общей чертой: протекание химических реакций носит очаговый характер и в существенной мере зависит от физико-химического взаимодействия окислителя и горючего компонента. Именно это обстоятельство, на наш взгляд, позволяет провести сравнение некоторых общих закономерностей изменения условий возбуждения взрыва и детонационной способности систем ПХА — горючее при изменении процентного соотношения компонентов.

Остановимся на особенностях возбуждения взрыва в смесях ПХА — горючее при механических воздействиях. Процесс возбуждения взрыва в системах окислитель — горючее удобно характеризовать величиной критического напряжения возбуждения взрыва $\bar{p}_{кр}$. В отличие от принятой трактовки $\bar{p}_{кр}$ в работе [6] для индивидуальных ВВ критическое напряжение возбуждения взрыва для смесей окислитель — горючее определяется как минимальное напряжение всестороннего сжатия, при котором в процессе прочностного разрушения заряда ВС на контактных поверхностях возникают разогревы, соответствующие началу интенсивного термического разложения окислителя и химического взаимодействия продуктов его разложения с горючим компонентом.

Такое определение величины $\bar{p}_{кр}$ возбуждения взрыва при ударе в смесях окислитель — горючее следует из механизма образования очага взрыва, построенного на базе большого экспериментального материала, которой получен при изучении чувствительности модельных двойных композиций ПХА, ПХК, аммиачной селитры и других окислителей с горючими добавками. В качестве горючего компонента использовались полимерные материалы, различные углеводороды, порошки металлов и т. д. По отношению к взрывчатым системам на основе ПХА в основу

механизма заложена гипотеза о сохранении закономерностей термического разложения ПХА при формировании эффективного очага возбуждения взрыва при механических воздействиях, подобно тому как это имеет место в изотермических условиях. Наиболее важным моментом в предлагаемом механизме служит выявление роли химического взаимодействия между продуктами распада ПХА с горючим компонентом или продуктами его пиролиза. При этом физическая картина образования горячего очага выглядит следующим образом.

Очаг, обеспечивающий возбуждение взрыва ВС, образуется в две стадии. На стадии I за счет механических источников тепла происходит разогрев вещества на поверхностях трения в заряде ВС до температуры, соответствующей началу разложения ПХА. В качестве таковых могут служить поверхности контакта заряда ВС с окружающим материалом либо поверхности, образующиеся при прочностном разрушении заряда в объеме ВС, как это отмечалось в [7]. На стадии I уровень разогрева определяется главным образом физико-механическими свойствами ВС и особенностями деформации заряда.

На стадии II при достижении в зонах трения температуры, соответствующей началу интенсивного термического разложения ПХА, очаги разогрева локализируются прежде всего на поверхностных дефектах кристаллов (трещины, полости и т. д.), играющих роль активных центров химической реакции [8, 9]. Образующиеся в процессе термического разложения активные продукты низкотемпературного распада ПХА (HClO_4 , окислы хлора) вступают в химическое взаимодействие с находящимися в непосредственном контакте с очагом горючим компонентом или продуктами его пиролиза. В результате реакций химического взаимодействия между низкотемпературными продуктами распада ПХА и горючим компонентом происходит дополнительное выделение тепла. Это приводит к росту температуры в очаге и все более глубокому разложению окислителя. Процесс носит самоускоряющийся характер вплоть до воспламенения очага.

На стадии II основную роль в достижении критической температуры играют химические источники тепла, а не механические, связанные с неупругой деформацией заряда. Поскольку рост температуры в очаге обеспечивается на этой стадии реакциями химического взаимодействия компонентов, важное значение при этом приобретает реакционная способность окислителя и горючего, термостойкость горючего и его теплопроводная способность. Чем более реакционноспособны компоненты, чем меньше термостойкость горючего и выше его калорийность, тем более интенсивно происходит процесс химического взаимодействия.

С позиций химического взаимодействия окислителя и горючего интересно проследить за ходом изменения $\bar{p}_{кр}$ возбуждения взрыва в зависимости от процентного соотношения компонентов и их реакционной способности. На рис. 1 приведены зависимости $\bar{p}_{кр}$ от состава для смесей ПХА+ПММА [3] (1 — размер частиц ПХА 4 мкм, 2 — 250—315 мкм), откуда следует, что в зависимости от состава $\bar{p}_{кр}$ сильно изменяется и принимает минимальное значение вблизи стехиометрического состава. Даже небольшое количество горючей добавки (несколько процентов) резко снижает значения этого параметра, свидетельствуя о сильном химическом взаимодействии компонентов и увеличении чувствительности смесей. Аналогичный вид принимают зависимости для смесей ПХА с фторпластом, парафином, различными каучуками, полиэфирами, порошком алюминия и с другими горючими компонентами. Исследование смесей на основе других окислителей, таких как перхлорат калия, аммиачная селитра и т. д.,

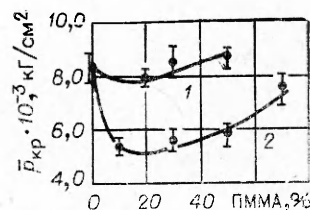


Рис. 1.

указывает на универсальность характера зависимостей $\bar{p}_{кр}$ возбуждения взрыва от состава смеси при ударе.

Есть еще одна особенность в поведении смесей окислитель — горючее при механических воздействиях. На условия возбуждения взрыва довольно заметное влияние оказывает размер частиц окислителя. Из рис. 1, например, следует, что при изучении смесей ПХА+ПММА зависимость $\bar{p}_{кр}$ от состава для мелкого ПХА лежит значительно выше, чем для крупного, т. е. возбуждение взрыва с увеличением размера зерна ПХА облегчается, а следовательно, увеличивается и чувствительность смесей. Подобная закономерность наблюдалась и для других взрывчатых композиций на основе ПХА. Принимая во внимание, что реакционная способность ПХА на низкотемпературной стадии его разложения зависит от дефектности структуры кристаллов [8, 9], можно предположить, что степень дефектности крупных кристаллов ПХА значительно выше, чем мелких, и это обстоятельство определяет поведение всей взрывчатой системы в целом при ударе. В качестве доказательства правоты такого предположения можно привести результаты дериватографического анализа низкотемпературного разложения ПХА разных партий. В этих опытах степень дефектности кристаллов определялась глубиной разложения ПХА на низкотемпературной стадии.

На рис. 2 приведена зависимость $\bar{p}_{кр}$ возбуждения взрыва при ударе от глубины разложения ПХА η на низкотемпературной стадии для смесей ПХА — ПММА (80/20). Верхние точки на кривой соответствуют смесям, в которых размер частиц ПХА составляет несколько микрон, а нижние — крупнокристаллическому ПХА (200—315 мкм) и ПХА, предварительно обработанному ударными волнами, с высокой степенью дефектности кристаллов [10]. В подтверждение высказанной гипотезы следует отнести и результаты работы [11], где при изучении низкотемпературной стадии термического разложения ПХА показано, что в крупных кристаллах на этой стадии разлагается только межблочное вещество и реакция разложения не проникает внутрь блоков мозаики, представляющих собой очень мелкие кристаллы, почти не содержащие дефектов. Дополнительным фактором, определяющим более высокую реакционную способность крупнокристаллического ПХА, служит механическое разрушение зерен окислителя в процессе удара с образованием новых активных поверхностей.

Все отмеченные особенности поведения взрывчатых систем окислитель — горючее при ударе проявляются только тогда, когда на образование эффективных очагов возбуждения взрыва сильное влияние оказывает химическое взаимодействие компонентов или продуктов их термического разложения. Однако встречаются случаи, когда зависимость $\bar{p}_{кр}$ от состава смеси принимает совершенно иной вид. Иллюстрацией такого случая может служить рис. 3, 2, где изображена зависимость $\bar{p}_{кр}$ возбуждения взрыва при ударе в смесях ПХА+ПХМА. Перхлорат метиламина (ПХМА) представляет собой мощное, хорошо сбалансированное ВВ, обладающее высокой чувствительностью к механическим воздействиям. Собственное значение $\bar{p}_{кр}$ возбуждения взрыва

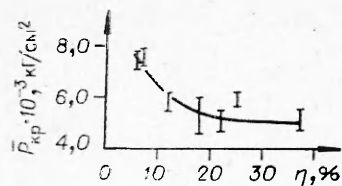


Рис. 2.

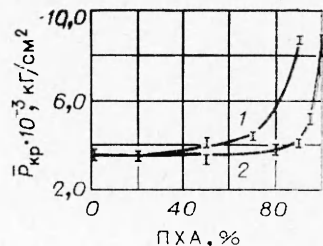


Рис. 3.

ПХМА при ударе составляет 3,5 кбар. При рассмотрении поведения системы ПХА+ВВ при ударе всегда надо учитывать, что возбуждение взрыва таких смесей может определяться двумя конкурирующими процессами — образованием эффективного очага взрыва на частицах мощного ВВ и образованием очагов за счет химического взаимодействия низкотемпературных продуктов термического разложения ПХА с продуктами разложения ВВ, подобно системам окислитель — горючее. Определяющая условия возбуждения взрыва смесей роль того или иного процесса устанавливается по виду зависимости $\bar{p}_{кр}$ от процентного соотношения компонентов. Исходя из характера зависимости $\bar{p}_{кр}$ от состава для смесей ПХА+ПХМА на рис. 3, можно утверждать, что в широком диапазоне соотношений компонентов ПХМА определяет условия возбуждения взрыва смесей, что выражается в постоянстве значений $\bar{p}_{кр}$ в этих смесях, соответствующих $\bar{p}_{кр}$ перхлората метиламина.

Аналогично системам ВВ+ВВ и ВВ+инертная добавка, поведение которых при ударе исследовалось в [1], условия возбуждения взрыва в рассматриваемой двухкомпонентной системе определяются критическими параметрами инициирования взрыва мощного ВВ. Дополнительное тепловыделение за счет разложения ПХА или за счет взаимодействия продуктов разложения ВВ и ПХА увеличивает полноту химического превращения компонентов смеси на стадии распространения взрыва из очага по заряду ВВ в зоне удара, способствуя сохранению низких значений параметров инициирования в смесях.

Влияние тепловыделения в среде, окружающей очаг, на параметры инициирования наглядно прослеживается при сравнении зависимостей $\bar{p}_{кр}$ от состава для смесей ПХА+ПХМА (см. рис. 3, 2) и ПХМА+ПММА (см. рис. 3, 1). Разбавление взрывчатого компонента (ПХМА) инертной горючей добавкой (ПММА) приводит к возрастанию $\bar{p}_{кр}$ смесей по сравнению с составами ПХМА+ПХА с одинаковым содержанием ВВ. По мере разбавления ВВ инертным веществом $\bar{p}_{кр}$ смесей растет беспредельно, тогда как в системах с ПХА этот рост ограничен $\bar{p}_{кр}$ ПХА.

Отмеченные особенности изменения условий возбуждения взрыва при ударе в системах ПХА+ПХМА позволяют сделать заключение, что механизм инициирования таких смесей в основном аналогичен механизму инициирования твердых ВВ [4]. Этот механизм проявляется, по нашему мнению, только тогда, когда $\bar{p}_{крВВ} < \bar{p}_{крПХА}$, и скорость взрывчатого превращения ВВ значительно больше скорости процесса химического взаимодействия продуктов разложения ПХА и ВВ. В противном случае зависимость $\bar{p}_{кр}$ от состава и для смесей ПХА с ВВ имеет типичный для химически взаимодействующих систем вид (табл. 1).

Рассмотрим зависимости критического диаметра детонации $d_{кр}$ порошков окислитель — горючее от состава. Если горючий компонент — невзрывчатое вещество, ход зависимостей $d_{кр}$ от состава смеси практически совпадает с ходом зависимостей $\bar{p}_{кр}$ от состава для смесей с химически взаимодействующими компонентами. В этом легко убедиться, если посмотреть на результат исследования детонационной способности порошков насыпной плотности ПХА+Al (табл. 2). Минимум $d_{кр}$, как видно из табл. 2, несколько смещен относительно стехиометрического соотношения компонентов в сторону смесей, обогащенных окислителем. Аналогичные зависимости $d_{кр}$ от состава получены при изучении детонационной спо-

Таблица 1
Зависимость $\bar{p}_{кр}$ от состава для смесей ПХА+октоген

Состав смеси	Отношение компонентов	$\bar{p}_{кр}$, кбар
ПХА	—	8,5
	90/10	6,5
	80/20	5,3
	60/40	4,5
ПХА/октоген	40/60	4,0
	30/70	4,4
	20/80	5,5
	10/90	5,5
Октоген	—	6,7

Таблица 2

Зависимость $d_{кр}$ детонации от состава

Отношение компонентов в составе ПХА/АІ	d_+ , мм	d_- , мм	D , м/с	$\tau \sim d/D$, мкс
100/0	16,0	15,0	2350	6,6
97,5/2,5	5,0	4,0	2350	1,9
95/5	4,0	3,0	2400	1,6
90/10	2,5	2,0	2450	1,0
80/20	3,0	2,5	2500	1,2
70/30	3,0	2,5	2400	1,3
60/40	10,0	8,3	2250	4,4

Примечание. d_+ — диаметр заряда, в котором наблюдалось устойчивое распространение детонации по всей длине, d_- — отказ детонации. Результаты приведены для смесей ПХА, с размером частиц 1—4 мкм и АІ — 0,3 мкм.

свидетельствует об очаговом характере возбуждения реакции при ударно-волновом воздействии на заряд ВВ и об особенностях развития очагов в зоне реакции в зависимости от соотношения между размерами прослоек окислителя и инертного горючего. Когда частицы ПХА разделены толстыми прослойками горючего, передача реакции между очагами, образованными на кристаллах окислителя, затрудняется (эффект обволакивания), что приводит к сдвигу минимума в область повышенного содержания ПХА. По мере измельчения компонентов взрывчатая система все более приближается к гомогенной. В результате условия образования и развития очагов реакции становятся наиболее благоприятными при стехиометрическом соотношении компонентов.

Таким образом, можно сделать вывод, который совпадает с выводом работ [12, 13], что для образования горячих очагов в системах окислитель+горючее, когда горючее не является мощным ВВ, при механических и при ударно-волновых воздействиях необходимо прежде всего возбудить реакцию разложения окислителя, а затем обеспечить условия для химического взаимодействия продуктов его распада с горючим компонентом.

При изучении детонационной способности смесей, образованных окислителем и мощным ВВ, мы по аналогии с рассмотренным выше случаем возбуждения взрыва при ударе сталкиваемся с другим типом зависимости $d_{кр}$ детонации от состава смеси. Он характеризуется постоянством значений $d_{кр}$ в широком диапазоне процентных соотношений компонентов, которые практически совпадают с $d_{кр}$ мощного ВВ. Как правило, область постоянных значений $d_{кр}$ распространяется до 20—30% содержания ВВ в смеси. Такой вид зависимости наблюдался при исследовании детонационной способности смесей ПХА+ПХМА (табл. 3) и в работах [14, 15].

Таблица 3

Состав смеси	$d_{кр}$, мм	Примечание
ПХМА	2,0	Размер частиц ПХМА 15—20 мкм
ПХМА/ПХА (40/60)	2,0	—
ПХМА/ПХА (20/80)	3,0	Размер частиц ПХА 1—4 мкм
ПХА	16,0	$\delta=0,6$

Из [14, 15] следует совершенно очевидный вывод, что $d_{кр}$ смесей остается на уровне $d_{кр}$ ВВ вплоть до 20—30% его содержания по массе. В области составов, богатых окислителем, повторяется зависимость, свойственная для химически взаимодействующих смесей окислитель — невзрывчатое горючее. В этом отношении наиболее интересны результаты работы [15], где авторами показано, что при содержании октогена в смеси до 15% по массе зависимость $d_{кр}(\delta)$ ведет себя типично для перхлоратных или аммиачно-селитренных составов с невзрывчатым горючим, т. е. $d_{кр}$ растет с увеличением плотности заряда. В смесях с содержанием октогена в количестве 15—20% $d_{кр}$ практически не меняется в зависимости от плотности. Большее содержание октогена приводит к тому, что зависимости $d_{кр}(\delta)$ становятся такими же, как и для индивидуальных мощных ВВ.

Изложенные результаты свидетельствуют о преимущественном протекании реакций взрывчатого превращения мощного ВВ в детонационной волне в критических условиях в смесях окислитель — мощное ВВ, а не реакций химического взаимодействия между компонентами при сравнительно высоком процентном содержании мощного ВВ. Для смесей окислитель — мощное ВВ можно представить следующую схему взрывчатого превращения ВС в детонационной волне. При воздействии инициирующей ударной волны в смеси возникают горячие очаги, которые создаются на частицах ВВ и окислителя. Однако за счет более высокой скорости реакций взрывчатого превращения в ВВ расход горючего компонента опережает расход окислителя, в результате чего в критических условиях реакции взаимодействия не успевают завершиться в волне и процесс детонации определяется в основном поведением ВВ.

Роль реакций разложения окислителя и химического взаимодействия компонентов возрастает по мере увеличения диаметра заряда и приближения его к предельному значению (при заданных плотности заряда и дисперсности компонентов). Обогащение смеси окислителем и увеличение его дисперсности способствуют протеканию этих реакций.

В заключение следует подчеркнуть, что роль химического взаимодействия между компонентами при формировании горячих очагов в случае удара и ударно-волнового воздействия может для одинаковых систем выступать в разной степени, что, по нашему мнению, связано прежде всего с различием времен задержек воспламенения ВС в сравниваемых формах воздействия. Роль мощного ВВ в смесях с окислителем проявляется значительно ярче при исследовании детонационной способности, чем при возбуждении взрыва при механическом воздействии. Наглядным примером в этом отношении могут послужить опыты по изучению зависимостей $\bar{p}_{кр}$ и $d_{кр}$ от состава для смесей ПХА+октоген. При ударе наблюдается сильное изменение $\bar{p}_{кр}$ (см. табл. 1) с достижением минимума вблизи стехиометрии, тогда как по данным работы [15] уже содержание октогена в смеси с ПХА, превышающее 20%, определяет почти полностью детонационную способность ВС.

Сравнение двух случаев инициирования ВС механическими воздействиями и ударными волнами, несмотря на некоторую неопределенность в первопричинах образования очагов возбуждения взрыва, указывает на несомненное сходство механизмов разогрева, а в ряде случаев (сильный механический удар, слабые ударные волны) и на возможное их совпадение. Рассмотрение особенностей условий возбуждения и развития взрыва в смесях окислитель — горючее и экспериментальное изучение закономерностей изменения $\bar{p}_{кр}$ и $d_{кр}$ в зависимости от свойств ВС дает возможность выявить общие черты возбуждения взрыва по схеме образования «горячих точек» при разных видах внешнего воздействия. В настоящей работе показано, что условия образования горя-

чих очагов в системах окислитель — горючее при механических и ударно-волновых воздействиях одинаковым образом определяются свойствами компонентов и способностью их к физико-химическому взаимодействию.

Поступила в редакцию
12/1 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Карпухин, В. К. Боболев. ФГВ, 1967, 3, 3.
2. И. А. Карпухин, В. К. Боболев. ФГВ, 1967, 3, 4.
3. И. А. Карпухин, В. К. Боболев, В. А. Теселкин. ФГВ, 1971, 7, 2.
4. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев. Инициирование твердых ВВ ударом. М., «Наука», 1968.
5. А. В. Дубовик. Канд. дис. ИХФ АН СССР, 1966.
6. Л. Г. Болховитинов. Докл. АН СССР, 1959, 126, 3220.
7. Г. Т. Афанасьев, В. К. Боболев и др. ФГВ, 1975, 11, 3.
8. В. В. Болдырев. Влияние дефектов в кристаллах на скорость термического разложения твердых веществ. Томск, Изд-во ТГУ, 1963.
9. Г. Б. Манелис, Ю. И. Рубцов, А. В. Раевский. ФГВ, 1970, 6, 1.
10. Г. А. Ададуров, И. А. Карпухин и др. — В сб.: Тезисы V Всесоюзной конференции по кинетике реакций в твердом теле. М., «Наука», 1974.
11. A. K. Galway, P. W. Jacobs. Proc. Roy. Soc., 1960. A254, 455.
12. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков и др. ФГВ, 1968, 4, 2.
13. Л. Н. Акимова, Л. Н. Стесик, А. Я. Апин. ФГВ, 1967, 3, 3.
14. А. Ф. Беляев. — В сб.: Вопросы теории ВВ. М., Изд-во АН СССР, 1947.
15. Л. Н. Акимова, Л. Н. Стесик. ФГВ, 1976, 12, 2.

О ВЗРЫВЕ НА ВЫБРОС В ПЕСКЕ

В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич, А. Р. Романов

(Москва)

Взрыв на выброс в песке представляет интерес при различного рода строительных работах в условиях песчаных засушливых земель (пустынь), при модельных экспериментальных исследованиях взрыва в лабораторных условиях, а также при оценке относительной работоспособности различных ВВ по методу воронкообразования.

Опыты показали, что взрывы на выброс в сухом песке обладают рядом особенностей, которые не укладываются в рамки общепринятых представлений о взрыве на выброс в грунтах естественного залегания. Лабораторные эксперименты проводились в кварцевом песке с насыпной плотностью 1,5 г/см³, влажностью менее 0,5%, пористостью 40% с зарядами тэна массой 0,8 г (1,12 г ТНТ или 1120 кал). После каждого взрыва тщательно (с точностью до 1%) замерялись все геометрические размеры воронки выброса до первоначального уровня грунта. Число взрывов на одной глубине изменялось от 3 до 8. Все экспериментальные данные приведены в табл. 1. Средняя погрешность всех величин не превышает 15%. В табл. 1 приведены величины расчетных расходов ВВ (q, q_1), вычисленных по формуле М. М. Борескова [1, 2]

$$E = qW^3(0,4 + 0,6n^3) \quad (1)$$

и Г. И. Покровского [3, 4]

$$E = 0,55q_1W^3(1 + n^2)^{3/2}. \quad (2)$$