

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К УДАРУ БИНАРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ С УГЛЕМ

В. А. Теселкин, В. Н. Маршаков

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 117977 Москва

Проведены копровые испытания закономерностей возбуждения взрыва бинарных смесей угля с баллистичным порохом и смесевым твердым ракетным топливом при ударе. Установлено, что с увеличением содержания угля в смесях снижается их механическая чувствительность. Проанализировано влияние влаги на чувствительность смесей к удару. Дана рекомендация наиболее безопасного способа загрузки компонентов в смеситель на стадии приготовления топливных рецептур требуемого состава.

Ликвидация различных видов оружия остро поставила задачу поиска способов утилизации порохов (пироксилиновых, нитроглицериновых) и смесевых твердых ракетных топлив (ТРТ). Одним из путей вторичного использования ТРТ является их применение как компонентов при построении рецептур суррогатных промышленных взрывчатых веществ (ВВ). Однако для смесевых ТРТ на основе перхлората аммония (ПХА) это неприемлемо ввиду выброса в атмосферу хлористого водорода, что приведет к загрязнению окружающей среды.

Другим путем использования смесевых ТРТ может быть включение их в состав композиционных горючих материалов на основе низкокалорийных природных топлив [1, 2]. Экологическая чистота процесса горения таких композиций, например, в печах слоевого сжигания, достигается за счет поглощения хлористого водорода минеральной частью природного топлива (бурого угля, торфа) и с помощью специальных нейтрализующих добавок. Исследования механизма горения брикетов из смесей нитроглицеринового пороха Н с бурым углем, а также смесевых ТРТ с бурым углем с целью получения оптимальных закономерностей горения брикетов и экологической чистоты процесса представлены в работах [1–4].

Настоящая работа посвящена изучению чувствительности бинарных композиций ТРТ с углем к механическим воздействиям, что необходимо знать для организации взрывобезопасного процесса приготовления смесей и пресования из них брикетов. С учетом этого обстоятельства исследованы закономерности воз-

буждения взрыва этих композиций при ударе в зависимости от массового соотношения компонентов и дано сопоставление их по чувствительности с хорошо изученными штатными взрывчатыми материалами.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследований были компоненты, из которых составлялись смеси, и сами смеси с различным массовым содержанием компонентов. Были взяты: нитроглицериновый порох Н (НГЦ — 28 %, НКЛ — 57 %, ДНТ — 11 % и добавки — 4 %), смесевые ТРТ (ПХА — 68 %, горючесвязующее — 14 %, Al — 18 %) и подмосковный бурый уголь, который (в среднем по бассейну) содержит органическую часть — 54,6 %, минеральную — 37,3 % и влагу — 8,1 %. Для приготовления образцов топлива и уголь измельчали в фарфоровой ступке (порох Н и смесевые ТРТ в среде жидкого азота) до размера частиц меньше 300 мкм.

Эксперименты проводили на вертикальном копре К-44-II (при массе груза 10 кг) с использованием тензометрического метода регистрации давления и с фиксацией момента взрыва при помощи фотоэлектрического датчика в процессе удара. Об условиях возбуждения взрыва тонких слоев исследуемых систем судили по значению критического напряжения возбуждения взрыва ($p_{кр}$); напряжение определяли экспериментально как давление, соответствующее переходу от механического разрушения образцов без взрыва, называемого «отказ», к разрушению, сопровождаемому взрывом («взрыв» при ударе, в соответствии с выводами работы [5]). При этом считалось, что

чем ниже значение $p_{кр}$, тем выше чувствительность исследуемой смеси — взрывчатого материала. Отметим, что указанный метод определения $p_{кр}$ справедлив для хрупко разрушающихся взрывчатых материалов и не может быть использован для веществ, которые перед разрушением испытывают большую относительную деформацию (более 10 %) либо деформируются вязкопластически.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

При исследовании самих ТРТ (пороха и смесевых ТРТ) путем ударного нагружения было обнаружено, что тонкие прессованные слои этих взрывчатых материалов хрупко разрушаются в диапазоне толщин зарядов меньше 0,6 мм. При этом наблюдается переход от «отказов» к «взрывам», что позволило оценить значение $p_{кр}$ по методу критических напряжений. Полученные значения $p_{кр}$ для пороха и смесевых ТРТ составили $(0,49 \pm 0,01)$ ГПа и $(0,32 \pm 0,01)$ ГПа соответственно.

Эти данные свидетельствуют о том, что смесевое топливо характеризуется более высокой чувствительностью, чем баллиститный порох. Следует отметить, что возбуждение взрыва в смесевых ТРТ, как правило, осуществляется легче, чем вторичных ВВ. Например, для октогена $p_{кр} = 0,65$ ГПа и для ГНТ $p_{кр} = 1,05$ ГПа [5]. Как видим, инициирование взрыва образцов ТРТ происходит при значительно меньших значениях $p_{кр}$, чем у вторичных ВВ. Возбуждение взрыва в материалах типа смесевые ТРТ протекает по механизму химического взаимодействия компонентов, в то время как инициирование твердых ВВ — по механизму, в котором основную роль играют реакции взрывного разложения самого ВВ.

Несмотря на легкость возбуждения взрыва смесевых ТРТ, процесс распространения взрыва в них протекает более затрудненно, чем в ВВ. Объясняется это, в частности, присутствием в составе смесевых ТРТ горючесвязывающего, которое благодаря своим эластическим свойствам препятствует прогрессивному развитию реакционной поверхности за счет трещинообразования при переходе горения во взрыв и тем самым затрудняет распространение взрыва в топливе. Известно также, что ТРТ уступают вторичным ВВ по детонационной способности и имеют более высокие (на порядок и более) значения критических диаметров детонации. Можно полагать, что добавле-

ние угля к ТРТ приведет к затруднению как инициирования, так и распространения взрыва в этих смесях, а следовательно, и к снижению их чувствительности к механическим воздействиям.

Прежде чем перейти к изложению экспериментальных данных по инициированию смесей ТРТ с углем, отметим некоторые особенности поведения прессованных образцов измельченного угля при их ударном нагружении. В опытах было обнаружено, что тонкие слои угля при ударе претерпевают хрупкое разрушение в исследуемом диапазоне толщин $(0,3 \div 0,95)$ мм. При выбросе вещества из зоны сжатия в потоке продуктов разрушения наблюдались раскаленные частицы угля желтого цвета. Причина появления «искрящихся» частиц угля, по видимому, заключается в том, что из-за высокой прочности вещества (эксперименты дали значение прочности угля $\sigma_{пр} = 190$ МПа) на поверхностях разрушения образца происходит локальный разогрев частиц до высоких температур, сопровождающийся испарением летучих составляющих угля с последующим их окислением кислородом воздуха при разлете из зоны удара в окружающую среду. В пользу приведенного объяснения свидетельствует и тот факт, что в аналогичных экспериментах по ударному нагружению тонких слоев двуокиси кремния — вещества, имеющего более высокую прочность, чем уголь, и не содержащего, как известно, органических летучих, появления раскаленных частиц при разрушении образцов не наблюдалось.

Присутствие светящихся частиц угля в продуктах разрушения образцов вызывало срабатывание фотодиода, в силу чего фотоэлектрический метод оказался непригодным для однозначной фиксации момента взрыва в опытах со смесями ТРТ — уголь. Основным критерием, по которому судили о факте взрыва, служил ожог роликов, устанавливавшийся при визуальном осмотре торцевых поверхностей пуансонов после проведения опыта.

Как было показано в работе [6], при разбавлении ВВ инертной добавкой наблюдается монотонное возрастание значения $p_{кр}$ для смесей с увеличением содержания добавки в системе. Подобный характер зависимости $p_{кр}$ от состава обнаружен и в композициях ТРТ с углем (см. таблицу).

Из представленных в таблице данных следует, что разбавление ТРТ углем повлекло за собой существенное (более чем в 2 раза) повы-

Сравнительная характеристика условий возбуждения взрыва бинарных композиций ТРТ — уголь и некоторых твердых ВВ

| Взрывчатые материалы | $p_{кр}$, ГПа |
|----------------------------|----------------|
| ТНТ | 1,05 [5] |
| Порох Н/уголь (30/70) | 1,07 ± 0,02 |
| Порох Н/уголь (50/50) | 0,96 ± 0,02 |
| Пикриновая кислота | 0,95 [5] |
| Смесевое ТРТ/уголь (20/80) | 0,92 ± 0,02 |
| ПХА | 0,85 ± 0,02 |
| Смесевое ТРТ/уголь (40/60) | 0,73 ± 0,03 |
| Гексоген | 0,74 ± 0,02 |
| Октоген | 0,65 ± 0,01 |
| Порох Н | 0,49 ± 0,01 |
| Смесевое ТРТ | 0,32 ± 0,01 |

Примечание. В скобках дано массовое соотношение компонентов в процентах.

шение критического напряжения возбуждения взрыва смесей по сравнению с исходными ТРТ. При этом чем выше концентрация угля, тем ниже чувствительность бинарных композиций. Состав порош Н/уголь (30/70) по чувствительности (с точки зрения возбуждения взрыва) находится на уровне ТНТ, а составы пороха Н и смесевое ТРТ с углем при содержании ТРТ 50 и 20 % соответственно — на уровне пикриновой кислоты. Эксперименты показали, что композиции на основе смесевое топлива характеризуются более высокой чувствительностью, чем смеси, содержащие баллиститный порошок, ввиду большей чувствительности смесевых ТРТ по сравнению с порошком Н.

Поскольку на различных этапах технологического процесса приготовления топливных брикетов компоненты смесей могут увлажняться, целесообразно проанализировать влияние влаги на чувствительность композиций. Естественно, что присутствие жидкого компонента — воды — в смесях снизит их механическую прочность. А это, согласно работе [5], вызовет уменьшение чувствительности композиций к удару. В композициях, содержащих смесевые ТРТ на основе ПХА, действие влаги, наряду с уменьшением механической прочности системы, может проявляться в ингибировании химического взаимодействия компонентов на стадии формирования очагов взрыва в частицах топлива. Последнее затруднит достижение критических условий теплового воспламенения очага и приведет тем самым к уменьшению чувствительности системы. Факт ингибирующего действия воды при иницировании композиции

ПХА — горючее установлен в работах [7, 8], где показано, что увлажнение ПХА 0,5 % воды заметно снижает чувствительность композиций. Так, значение $p_{кр}$ смесей на основе увлажненного ПХА возросло примерно на 30 % по сравнению со смесями с сухим окислителем. Согласно [7, 8] превалирующую роль в ингибировании взрыва бинарных композиций ПХА — горючее играют реакции химического взаимодействия продуктов низкотемпературного распада ПХА (хлорная кислота, окислы хлора) с горючей добавкой. Поэтому установленный флегматизирующий эффект при увлажнении ПХА объясняется авторами [7, 8] связыванием хлорной кислоты водой, в результате чего образуются более устойчивые ее полигидраты, обладающие, как известно [9, 10], меньшей реакционной способностью, чем безводная хлорная кислота.

Таким образом, увлажнение компонентов смесей ТРТ — уголь способствует снижению их взрывоопасности.

Разбавление углем порошкообразных ТРТ ухудшает не только условия возбуждения, но и распространения взрыва. При осмотре торцевых поверхностей пуансонов после удара установлено, что в случае взрыва ожоги роликов имели локальный характер, как правило, нитевидной или русловидной формы желтого цвета. Звуковой эффект взрыва был слабым и практически не отличался от звука, сопровождавшего механическое разрушение образцов при ударе без взрыва. Локальность ожогов, их цвет, свидетельствующий о низкой температуре продуктов взрыва, наличие остаточных слоев вещества после удара — все это указывает на затрудненный характер развития процессов взрывного превращения смесей из очага воспламенения.

В [1–4] было установлено оптимальное содержание ТРТ в смеси с углем. Так, доля баллиститного пороха в смеси не должна превышать 30 %, а ТРТ — не более 20 ÷ 25 %. Такие концентрации ТРТ обеспечивают эффективное сгорание брикета в печи в «послойном» режиме горения. Если доля ТРТ в смеси будет больше указанных значений, то в брикетах устанавливается «эстафетный» режим горения: горение распространяется по цепочкам из частиц ТРТ вглубь брикета. Это может привести к чрезмерно быстрому выделению большого количества продуктов сгорания, т. е. создаст нерасчетный режим работы печи.

Рассматривая данные, полученные при ис-

следовании смесей ТРТ — уголь можно сделать вывод, что соотношения компонентов смеси ТРТ — уголь 20/80 или 30/70 оптимальны как с точки зрения обеспечения эффективного горения в печи, так и с позиций наиболее безопасного производства, так как характеризуются крайне низким уровнем чувствительности к механическим воздействиям. По результатам исследований можно дать практическую рекомендацию наиболее безопасной загрузки компонентов в смеситель на стадии приготовления топливной рецептуры требуемого состава, а именно: сначала в смеситель загружается уголь, а затем порционно крошка ТРТ. Такая последовательность загрузки компонентов позволит свести к минимуму образование смесей с высокой концентрацией ТРТ и будет отвечать требованию низкой пожаровзрывоопасности технологического процесса приготовления рецептур на основе твердых ракетных топлив и угля.

Итак, в ходе проведения работы измерены критические параметры возбуждения взрыва баллиститного (порох Н) и смесевых топлив при ударе. Установлено, что баллиститный порох характеризуется меньшей чувствительностью к удару, чем смесевые ТРТ.

Показано, что при добавлении угля к ТРТ сильно возрастает значение $p_{кр}$ для смесей. Составы, содержащие более 70% угля, обладают крайне низкой механической чувствительностью.

Показано, что увлажнение смесей ТРТ с углем снижает их взрывоопасность.

Предложен порядок загрузки компонентов в смеситель, отвечающий требованию наименьшей пожаровзрывоопасности процесса приготовления топливных рецептур требуемого состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ананьев А. В., Истратов А. Г., Колесников В. И. и др.** Сжигание порохов и твердых ракетных топлив в композициях с углем и торфом // Конверсия. 1996. Вып. 96/3. С. 11–13.
2. **Маршаков В. Н., Истратов А. Г., Колесников В. И. и др.** Перколяционные явления при горении смесей пороха с углем // Хим. физика. 1996. Т. 15, № 9. С. 143–147.
3. **Anan'ev A. V., Istratov A. G., Kurochkin A. I., et al.** The solid propellant utilization by the burning of propellant-coal and propellant peat mixtures // 4 Intern. Symp. on Special Topics in Chemical Propulsion, May 27–31, 1996. Stockholm, Sweden, 1996. P. 201–202.
4. **Истратов А. Г., Колесников В. И., Маршаков В. Н. и др.** Влияние нейтрализующих добавок на улавливание хлористого водорода и механизм горения смесей природного и смесевых ракетного топлив // XI Симпоз. по горению и взрыву, 18–22 ноября 1996, Черногоровка // Химическая физика процессов горения и взрыва. Черногоровка, 1996. Т. 2. С. 134–136.
5. **Афанасьев Г. Т., Боболев В. К.** Инициирование твердых ВВ ударом. М.: Наука, 1968.
6. **Карпухин И. А., Боболев В. К., Теселкин В. А. и др.** О некоторых особенностях возбуждения взрыва ударом и детонационной способности смесей окислитель — горючее // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 2. С. 140–146.
7. **Карпухин И. А., Боболев В. К., Теселкин В. А.** О механизме возбуждения взрыва ударом в смесях перхлората аммония с горючими добавками // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 2. С. 261–264.
8. **Боболев В. К., Карпухин И. А., Теселкин В. А.** Роль химического взаимодействия компонентов при возбуждении взрыва ударом в смесях перхлората аммония и горючего // Горение и взрыв: Материалы Третьего всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. М.: Наука, 1972. С. 515–518.
9. **Светлов Б. С., Коробан В. А.** О торможении химического разложения перхлората аммония продуктами распада // Кинетика и катализ. 1967. Т. 8, вып. 2. С. 456–459.
10. **Росоловский В. Я.** Химия безводной хлорной кислоты. М.: Наука, 1966.

Поступила в редакцию 14/V 1997 г.