

8. Г.В.Белов, Ю.Б.Базаров, Е.П.Дякин, С.Н.Екимчев, А.К.Жиембетов, В.С.Зималин, И.В.Олейников, В.А.Тилькунов, А.В.Шишканов, Н.И.Шустова. Влияние скорости удара на параметры взрыва образцов флегматизированного октогена // Труды международной конференции 11 Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 2009, с.51-54.
9. Г.В.Белов, Ю.Б.Базаров, С.Н.Васенин, О.В.Колмаков, Е.Н.Костюков, А.В.Кудашов, А.Н.Тюрин, А.В.Шишканов, Н.И.Шустова. Влияние предварительного механического повреждения и пористости ВВ на условия инициирования и параметры взрыва при ударе. // Труды международной конференции 17 Харитоновские тематические научные чтения, Саров, 2015, с.128–134.
10. Г.В. Степанов. Расчет глубины внедрения недеформируемого шара в массивную преграду // Проблемы прочности. № 3, 1969, с. 78–81.
11. И.Р. Клейс, Х.Ф. Кангур. Экспериментальное и расчетное определение глубины повреждений от удара сферического индентора // Трение и износ. 1987, т.8, №4, с. 605-613.
12. С.Т. Милейко, С.Ф. Кондаков, Е.П. Голофаст. Об одном случае пробивания // Проблемы прочности. 1979, №12, с. 69-71.
13. С.Ф. Кондаков, О.А. Саркисян. Влияние температуры на сопротивление пробиванию металлических преград // Проблемы прочности. 1980, №9, с. 69-71.

ОСОБЕННОСТИ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА И ТРИАМИНОТРИНITРОБЕНЗОЛА (ТАТБ)

Е.Н. Богданов, В.М. Бельский, А.В. Родионов, М.Е. Шаврин, В.И. Буренин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

В настоящее время при изучении процессов ударно-волнового инициирования взрывчатых веществ (ВВ) выделяют два основных механизма: гомогенный и гетерогенный [1]-[4]. Данные понятия относят в основном к жидким взрывчатым веществам [1]-[5], но в последнее время применяют и к твердым взрывчатым веществам: октоген и триаминотринитробензол (ТАТБ) [4].

При гомогенном инициировании после входа ударной волны (УВ) в ВВ спустя некоторый интервал времени (время индукции) у поверхности инициирования развивается реакция взрывчатого превращения (тепловой взрыв), в результате чего повышается давление. Данная реакция двигается по сжато ВВ в том же направлении, что и ударная волна. После догона ею фронта ударной волны формируется стационарная детонационная волна.

При гетерогенном инициировании рост параметров происходит на фронте ударной волны, реакция разложения «привязана» к нему. Волна непрерывно ускоряется до тех пор, пока не произойдет переход к детонации.

В докладе представлены результаты исследований особенностей инициирования составов на основе октогена и ТАТБ, которые проявляют признаки гомогенного и гетерогенного инициирования. Полученные результаты свидетельствуют о различном поведении взрывчатых составов на основе октогена и ТАТБ при их ударно-волновом нагружении.

Постановка экспериментов

Ударная волна прямоугольного профиля амплитудой ~ 2-20 ГПа с длительностью ~5-10 мкс создавалась с помощью взрывного плосковолнового нагружающего устройства (см. рисунок 1).

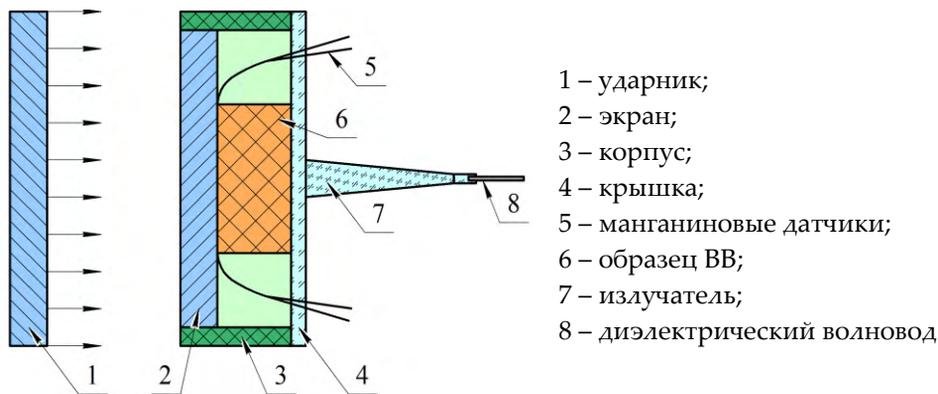


Рисунок 1. Схема проведения экспериментов

Для исследования процессов ударно-волнового инициирования взрывчатых составов на основе октогена и ТАТБ применены методики микроволновой диагностики и манганинового датчика давления. С помощью методики микроволновой диагностики [6]-[8] регистрировалось движение ударных и детонационных волн по образцу ВВ. С помощью методики манганинового датчика регистрировались профили давления на контактной границе экран-ВВ, а также в толщине ВВ.

Экспериментальные результаты

На рисунке 2 представлены экспериментальные зависимости перемещения, скорости и ускорения фронта инициирующей ударной волны от времени в составах на основе октогена и ТАТБ, полученные с помощью методики микроволновой диагностики.

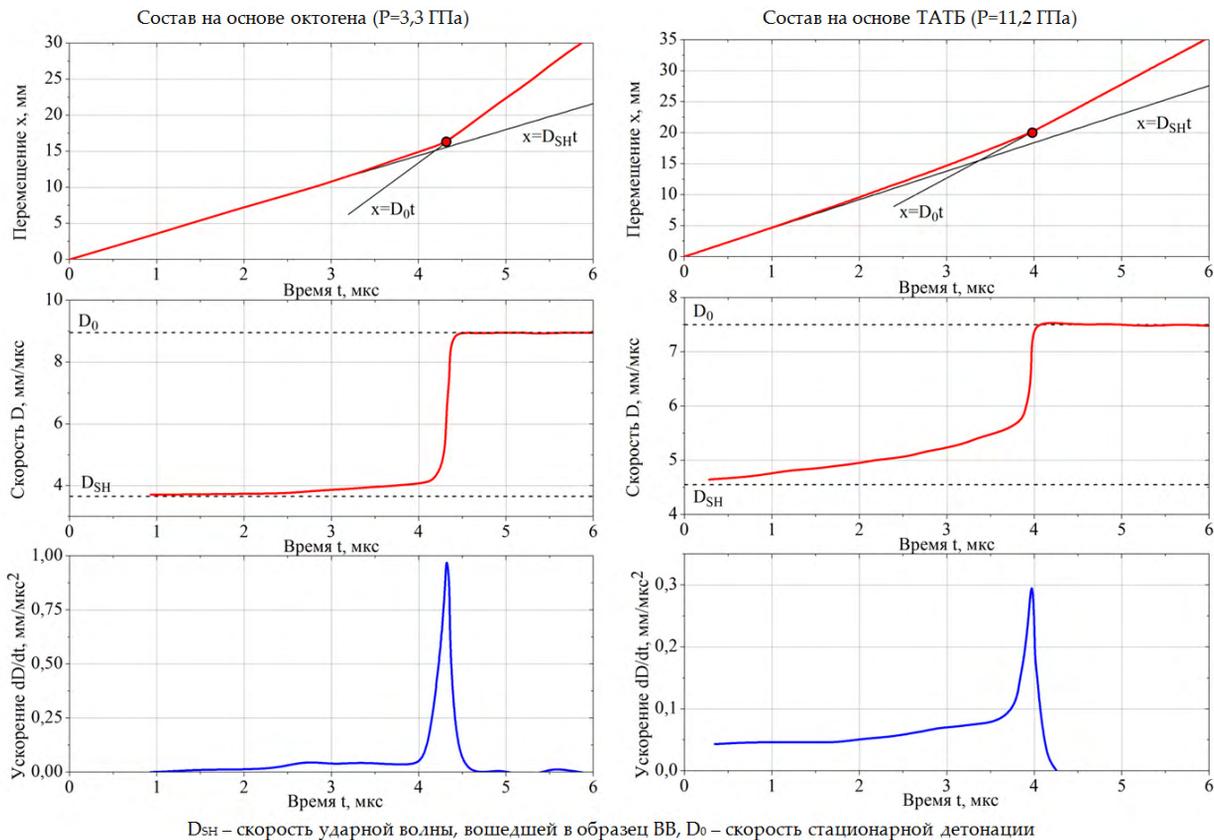


Рисунок 2. Зависимости перемещения, скорости и ускорения фронта инициирующей ударной волны от времени в составах на основе октогена и ТАТБ

Представленные на рисунке 2 непрерывные экспериментальные зависимости кинематических параметров инициирующих ударных волн показывают различный характер процессов ударно-волнового инициирования составов на основе октогена и ТАТБ. В данных экспериментах амплитуды ударных волн P подобраны таким образом, что длительности формирования детонационного режима в исследуемых составах практически равны между собой.

В составе на основе октогена вошедшая в образец ВВ ударная волна движется практически с постоянной скоростью, переход к стационарной детонации сопровождается скачком скорости.

В составе на основе ТАТБ ударная волна начинает заметно ускоряться с момента входа в образец. При этом если в составе на основе октогена в рассматриваемом конкретном случае (при практически равных длительностях формирования детонационного режима) максимальное значение ускорения фронта на преддетонационном участке составляет не более 5% от его значения в точке перехода, то в составе на основе ТАТБ оно растёт с 15% до 25%.

Особенно ярко данные различия заметны на рисунках 3 и 4, где представлены зависимости скорости фронта инициирующей ударной волны от времени в составах на основе октогена и ТАТБ, полученные при различных амплитудах инициирующих ударных волн.

Инициирующая ударная волна входит в образец ВВ на основе октогена и движется практически с постоянной скоростью (см. рисунок 3). Переход к детонации сопровождается скачком скорости.

Инициирующая ударная волна входит в образец ВВ на основе ТАТБ и сразу начинает заметно ускоряться (см. рисунок 4). Переход к детонации также сопровождается скачком скорости, но более плавно, чем в составе на основе октогена.

Профили давления, зарегистрированные на границе экран-ВВ (см. рисунки 5 - 8), также показывают характерные различия в формировании детонационного режима в рассматриваемых составах.

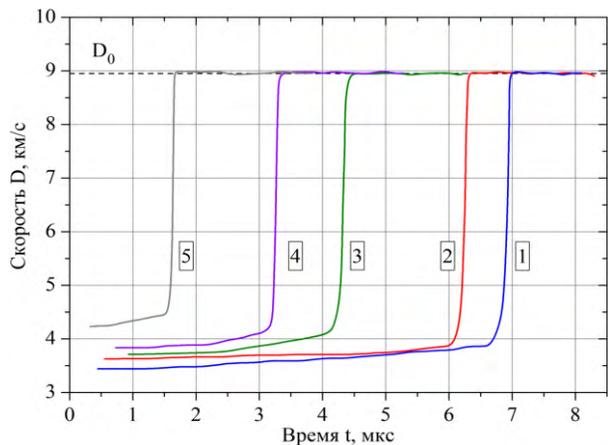
Профили давления, зарегистрированные на границе экран-ВВ на основе октогена (см. рисунок 5), показывают, что в диапазоне амплитуд ударной волны $\sim 3-5$ ГПа за её фронтом в первоначальный интервал времени не наблюдается заметного роста давления. Это свидетельствует о том, что реакция разложения, по-видимому, еще не началась. Она начинается позднее, что проявляется в росте давления. При увеличении амплитуды ударной волны развитие реакции разложения ускоряется, «горб» на профилях давления сдвигается к $t=0$.

Профили давления, зарегистрированные в глубине ВВ на основе октогена (см. рисунок 6), показывают движение области повышения давления («горба») ко фронту ударной волны.

Профили давления, зарегистрированные на границе экран-ВВ на основе ТАТБ (см. рисунок 7), показывают непрерывный рост параметров сразу с момента входа ударной волны. Это свидетельствует, по-видимому, о заметном разложении ВВ за фронтом ударной волны. При увеличении амплитуды ударной волны профили давления не претерпевают значительных трансформаций.

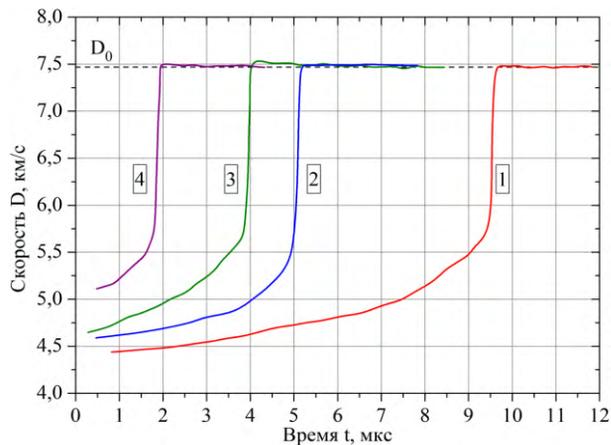
На рисунке 8 представлены профили давления, зарегистрированные в глубине состава на основе ТАТБ. Амплитуда ударной волны составляет ~ 10 ГПа.

Профили давления, зарегистрированные в глубине ВВ на основе ТАТБ, также показывают непрерывный рост параметров сразу с момента входа ударной волны. Однако можно видеть, что максимум давления находится немного позади фронта ударной волны, а не на нем, как было бы в случае чисто гетерогенного инициирования ВВ типа нитрометана [1]-[3]. Если в составе на основе октогена область роста давления и, соответственно зона разложения, возникает у поверхности инициирования, в случае состава на основе ТАТБ он движется вместе с фронтом. Данное обстоятельство подтверждают результаты методики микроволновой диагностики, представленные на рисунке 9.



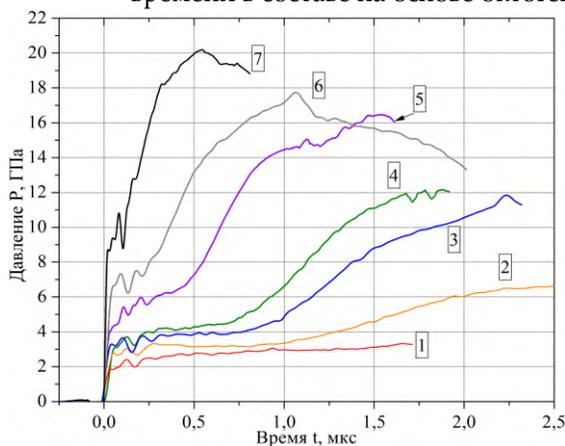
Амплитуда УВ, ГПа:
1 – 2,6; 2 – 2,8; 3 – 3,3; 4 – 3,9; 5 – 4,7

Рисунок 3. Зависимости скорости фронта УВ от времени в составе на основе октогена



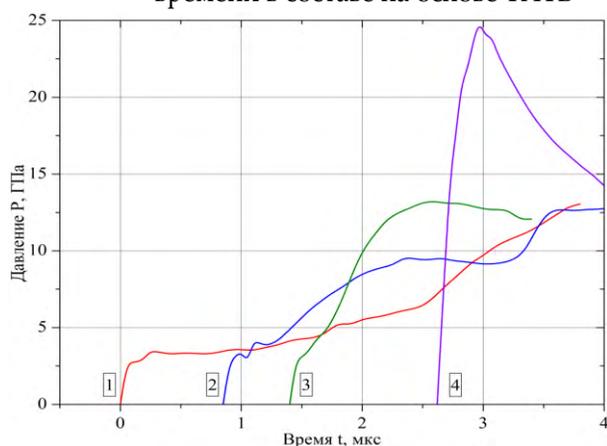
Амплитуда ударной волны, ГПа:
1 – 8,2; 2 – 10,2; 3 – 11,2; 4 – 13,0

Рисунок 4. Зависимости скорости фронта УВ от времени в составе на основе ТАТБ



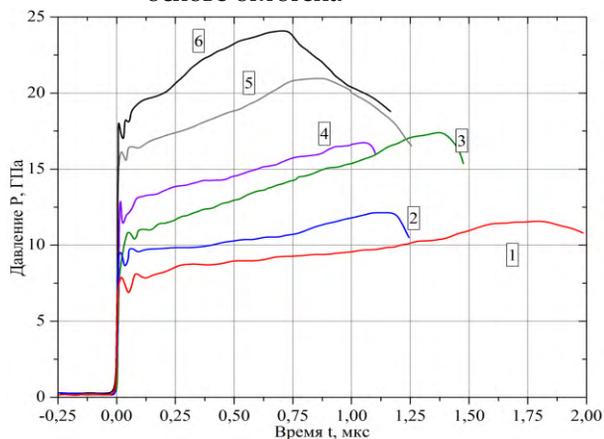
Амплитуда УВ, ГПа:
1 – 2,7; 2 – 3,0; 3 – 3,6; 4 – 4,2; 5 – 5,4; 6 – 8,7; 7 – 14,6

Рисунок 5. Зависимости давления на границе экран-ВВ от времени в составе на основе октогена



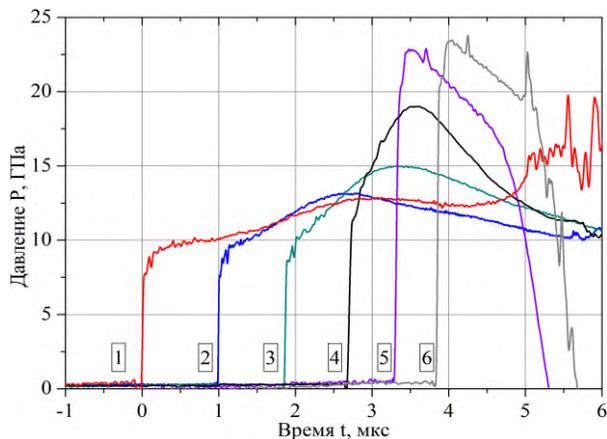
Глубина установки датчиков, мм:
1 – 0; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 10. Амплитуда УВ 3,5 ГПа

Рисунок 6. Зависимости давления от времени в составе на основе октогена



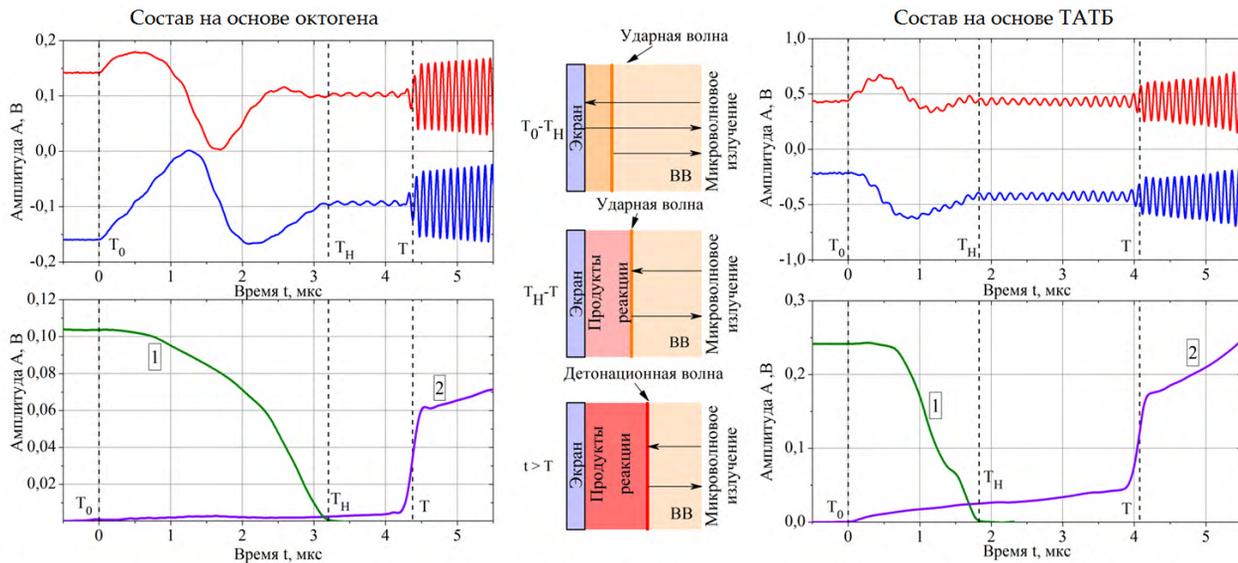
Амплитуда УВ, ГПа:
1 – 8,2; 2 – 9,5; 3 – 10,2; 4 – 13,0; 5 – 15,4; 6 – 17,4

Рисунок 7. Зависимости давления на границе экран-ВВ от времени в составе на основе ТАТБ



Глубина установки датчиков, мм:
1 – 0; 2 – 4; 3 – 8; 4 – 12; 5 – 16; 6 – 20. Амплитуда УВ 10 ГПа

Рисунок 8. Зависимости давления от времени в составе на основе ТАТБ



1 – амплитуда низкочастотной компоненты сигнала (определяется отражением микроволнового излучения от поверхности раздела экран-ВВ);
2 – амплитуда высокочастотной компоненты сигнала (определяется отражением микроволнового излучения от фронта ударной или детонационной волны)

Характерные моменты времени:

T_0 – вход ударной волны в образец ВВ;

T_H – затухание микроволнового излучения в продуктах реакции разложения ВВ;

T – возбуждение стационарной детонации

Рисунок 9. Экспериментальные интерферограммы

Как видно из рисунка 9 интерферограмма процесса инициирования состоит из трёх характерных участков. В момент времени $t=T_0$ контактная поверхность экран-образец начинает двигаться, а во взрывчатое вещество входит ударная волна. Сигнал в интервале от $t=T_0$ до $t=T_H$ состоит из двух компонент: высокочастотной компоненты, соответствующей отраженному от фронта ударной волны сигналу, и низкочастотной компоненты, соответствующей прошедшему через фронт и отраженному от границы экран – сжатое ВВ сигналу. В интервале от $t=T_0$ до $t=T_H$ отсутствует заметное влияние на распространение микроволнового излучения реакции разложения ВВ за фронтом ударной волны, с электродинамической точки зрения ВВ ведёт себя как инертный диэлектрический материал.

В момент $t=T_H$ сигнал, соответствующий отражению зондирующего излучения от границы раздела ВВ с экраном, исчезает (амплитуда обращается в нуль). После момента $t=T_H$ на интерферограмме присутствует только высокочастотная компонента, так как отражение зондирующего излучения происходит от фронта инициирующей ударной волны. Амплитуда высокочастотной компоненты определяется отражательной способностью фронта.

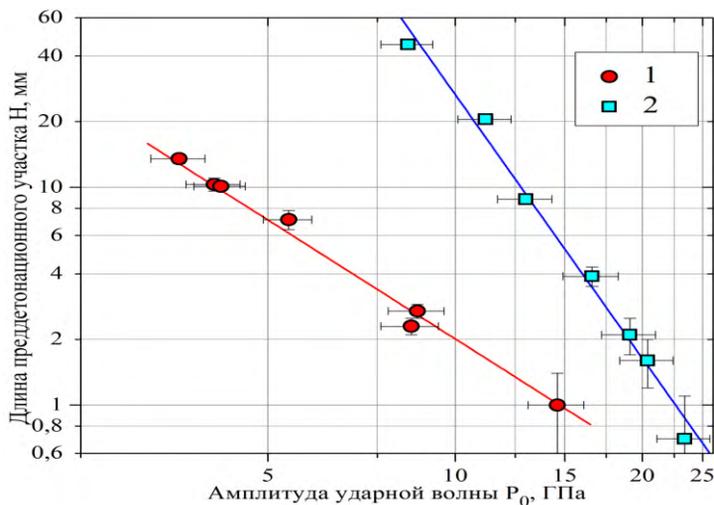
Затухание низкочастотной компоненты сигнала, соответствующей прошедшему сквозь ударный фронт и отраженному от экрана микроволновому излучению, связано с поглощением его за фронтом инициирующей ударной волны вследствие протекания реакции разложения, сопровождающейся появлением проводимости.

Рисунок 9 демонстрирует качественно схожий характер распространения микроволнового излучения в обоих случаях. Это свидетельствует о том, что реакция разложения исходно-сжатого ВВ не может протекать на фронте ударной волны. В ином случае, согласно [9]-[10], в момент времени $t=T_H$ наблюдалось бы скачкообразное увеличение амплитуды высокочастотной компоненты. С электродинамической точки зрения реакция разложения не имеет резкого фронта, а зона этой реакции располагается позади за фронтом ударной волны, а не на нем.

Это является подтверждением полученного с помощью методики манганинового датчика вывода о том, что зона реакции разложения в составе на основе ТАТБ находится за фронтом и движется вместе с ним.

При этом полученный вывод не противоречит результатам экспериментов с составом на основе октогена, при инициировании которого зона реакции разложения формируется вблизи плоскости инициирования и не привязана к фронту инициирующей ударной волны.

Исследуемые составы обладают существенно различной ударно-волновой чувствительностью, что видно из рисунка 10. Так, при равной амплитуде ударной волны длина преддетонационного участка в составе на основе ТАТБ может быть в разы и даже десятки раз больше таковой в составе на основе октогена.



1 – состав на основе октогена; 2 – состав на основе ТАТБ

Рисунок 10. Зависимости длины преддетонационного участка от амплитуды ударной волны

По-видимому, имеется связь между механизмом инициирования (гомогенный и гетерогенный) и ударно-волновой чувствительностью твердых ВВ.

Единственным отличием результатов настоящей работы от классических примеров гомогенного и гетерогенного инициирования нитрометана [1]-[3], [5] является «инверсия» ударно-волновой чувствительности. А именно, в данных работах получено, что чистый нитрометан проявляет признаки гомогенного инициирования. Сенсибилизированный нитрометан – соответственно гетерогенного. При этом последний является более чувствительным по сравнению с чистым нитрометаном. В настоящей работе, а также в [4] получен противоположный результат.

Данная особенность, по-видимому, связана с изначальной гетерогенностью твердых смесевых составов, поэтому применение понятий «гетерогенное инициирование» и «гомогенное инициирование» может быть не совсем корректно. В данном случае, как справедливо замечено в [4], следует оперировать определениями «больше гетерогенный» и «больше гомогенный», поскольку и в случае состава на основе октогена, и в случае состава на основе ТАТБ можно найти признаки, относящиеся к противоположному механизму инициирования.

Основные выводы представлены в виде таблицы, где содержится информация об основных признаках и характеристиках процесса перехода к детонации.

Таблица 1. Качественные характеристики процесса перехода к детонации в составах на основе октогена и ТАТБ

№	Признак	ВВ на основе октогена	ВВ на основе ТАТБ
1	Скорость фронта инициирующей ударной волны	Почти постоянная	Увеличивается по мере распространения волны
2	Давление за фронтом инициирующей ударной волны	На начальном этапе остается постоянным, после чего плавно растет	Начинает расти сразу за фронтом ударной волны
3	Переход к стационарной детонации	Сопровождается скачком скорости фронта	Скачок скорости менее резкий
4	Реакция разложения ВВ	Начинается спустя некоторый интервал времени у плоскости инициирования и догоняет фронт ударной волны, в результате возникает стационарная детонация	Возникает за фронтом ударной волны и движется вместе с ним, фронт ускоряется, происходит переход к детонации

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о различном поведении взрывчатых составов на основе октогена и ТАТБ при их ударно-волновом нагружении.

В составе на основе октогена вошедшая ударная волна (в интервале амплитуд ~3-5 ГПа) не вызывает заметного разложения исходно-сжатого ВВ. Это проявляется в отсутствии роста её скорости и давления за её фронтом. Реакция разложения начинается спустя некоторый интервал времени позади за фронтом ударной волны у поверхности инициирования. Это сопровождается ростом давления, что приводит к появлению волны реакции, которая начинает двигаться в направлении фронта. При этом её скорость выше скорости фронта ударной волны, в результате чего волна реакции догоняет фронт ударной волны. В данный момент происходит переход к детонации. Данное поведение характерно для гомогенного механизма инициирования детонации.

В составе на основе ТАТБ, по-видимому, реакция разложения начинается сразу за фронтом ударной волны и движется вместе с ним. В результате этого повышается давление, и фронт ударной волны начинает непрерывно ускоряться вплоть до возбуждения детонации, что характерно для гетерогенного механизма инициирования детонации.

Выявленные особенности поведения составов на основе октогена и ТАТБ представляют интерес при калибровке и верификации моделей кинетики детонации.

Список литературы

1. Campbell A.W., Davis W.C., Travis J.R. // Phys. Fluids, v. 4, 1961, p.498
2. Campbell A.W., Davis W.C., Ramsay J.B., Travis J.R. // Phys. Fluids, V. 4, 1961, p.511
3. Sheffield S.A., Engelke R., Alcon R.R. // Proceedings of 9-th International Detonation Symposium, 1989, pp. 39-49
4. Sheffield S.A., Gustavsen R.L., Hill L.G., Alcon R.R. // Proceedings of 11-th International Detonation Symposium, 1998, pp. 451-458
5. Детонационные волны в конденсированных средах / А.Н. Дремин, С.Д. Савров, В.С. Трофимов, К.К. Шведов. М.: Наука, 1970. 171 с.

6. Родионов А.В., Бельский В.М., Богданов Е.Н., Михайлов А.Л., Комиссаров В.В., Седов А.А. // Труды международной конференции «XI Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009, с. 69-73
7. Rae P.J., Glover B.V., Gunderson J.A., Perry W. Lee // Shock Compression of Condensed Matter, 2011
8. Бельский В.М., Михайлов А.Л., Родионов А.В., Седов А.А. // ФГВ, 2011 г., т. 47, № 6, с. 29-41
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982, 620 с.
10. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: НАУКА, 1967, 684 с.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ ПВ ВВ НА ОСНОВЕ ТАТБ

В.Б. Титова, А.А. Балашова, Е.Н. Богданов, Н.А. Володина, М.О. Ширшова, И.А. Тихонова

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

В настоящее время важным аспектом проведения расчетно-экспериментальных исследований взрывчатых веществ является калибровка уравнений состояния продуктов взрыва и кинетики взрывчатых превращений. Для этого проводится выработка таких постановок экспериментов, в которых сочетается наибольшая презентативность полученных экспериментальных результатов, и простота постановки эксперимента, необходимая для проведения численного моделирования.

Одним из широко применяемых направлений исследования взрывчатых веществ является исследование взаимодействия детонирующих взрывчатых составов с инертными преградами (метод «преград» [1]). Одним из вариантов проведения исследований является измерение скорости ударной волны в преграде, контактирующей с ВВ, в зависимости от пройденного расстояния. Если принять за условие, что преграда изготовлена из вещества, ударная адиабата которого известна с высокой точностью, то можно провести оценку профиля давления в детонационной волне на момент выхода к границе с преградой. Поскольку профиль давления в преграде является, фактически, «отпечатком» профиля давления в ДВ, масштабированным за счет различия динамической жесткости и скорости звука в ПВ и преграде.

В таком случае при выборе соответствующего нагружающего устройства и промежуточного инициатора с известными свойствами получаем систему, направленную на калибровку расчетно-теоретических моделей и тестирование уравнения состояния продуктов взрыва. Для взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом такая система дает возможность оценки влияния дополнительного энерговыделения за фронтом детонационной волны. Хотя вопросу коагуляции избыточного углерода и образованию наноалмазов при взрыве посвящено большое количество работ [2÷7 и др.], более общий вопрос о конденсации углерода за фронтом детонации ВВ с отрицательным кислородным балансом остается дискуссионным до настоящего времени. Ответ на него важен как для понимания физики явления, так и для определения количества энергии, которая выделяется при экзотермической реакции роста углеродных кластеров за пределами зоны химической реакции в детонационной волне.

В первых работах на эту тему в 1987-1991г.г.[2-4], где как раз рассматривался подход с точки зрения растянутого энерговыделения по времени, расчетным путем была показана возможность суммарной добавки примерно в 15% к химической энергии взрыва за времена порядка 0,5мкс для ВВ на основе ТАТБ. В работе [4] было высказано предположение, что процесс синтеза определяется зоной химической реакции. Связью времени образования кластеров с длительностью химической реакции и были обусловлены характерные времена (0,5мкс) и доля по энерговыделению. Дальнейшие исследования [5,6] показали, что процесс точнее описывается в предположении