

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ЭВОЛЮЦИИ ПРОФИЛЯ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА ЗА ФРОНТОМ РАСХОДЯЩЕЙСЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ВО ВЗРЫВЧАТОМ ВЕЩЕСТВЕ

К. Н. Панов, В. А. Комрачков

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва 607190 Саров, root@gdd.vniief.ru

Рентгенографическим методом исследована эволюция профиля плотности вещества за фронтом расходящейся инициирующей ударной волны во взрывчатом веществе на основе октогена и гексогена при переходном режиме взрывчатого превращения. Нагружение взрывчатого вещества проводилось расходящейся ударной волной через прокладку из оргстекла разной толщины. Установлены особенности эволюции профиля плотности за фронтом расходящейся инициирующей ударной волны, которая не переходит в детонационную, и для инициирующей ударной волны, переходящей в детонационную.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, инициирующая ударная волна, детонация, импульсная рентгенография, распределение плотности вещества.

ВВЕДЕНИЕ

Для исследования механизма инициирования детонации гетерогенных взрывчатых веществ (ВВ) ударной волной (УВ), наряду с данными о параметрах ударного фронта в переходной области, важна информация о процессах за ударным фронтом. В настоящее время для изучения взрывчатого превращения часто применяют электромагнитные и манганиновые датчики, которые находятся в контакте с исследуемым веществом и могут влиять на формирование детонационного режима. Метод импульсной рентгенографии при исследовании взрывчатого превращения в этом плане имеет несомненные преимущества. Он позволяет визуализировать исследуемый процесс и определять распределение плотности вещества за фронтом инициирующей УВ и в других характерных зонах нагружаемого ВВ: исходное ВВ; сжатое ударной волной ВВ; зона разлета продуктов взрыва.

Цель работы — исследование рентгенографическим методом эволюции профиля плотности вещества за фронтом расходящейся инициирующей УВ в ВВ на основе октогена и гексогена при переходном режиме взрывчатого превращения.

ПОСТАНОВКА ОПЫТОВ

Опыты проводились на импульсной рент-

геновской установке 2ЭРИДАН-3 с мягким спектром излучения с граничной энергией $E_{\gamma} \approx 0,75$ МэВ и длительностью импульса излучения $\Delta t \approx 0,3$ мкс. На рис. 1 представлена схема экспериментальной сборки. Система нагружения описана в работах [1, 2]. Инициирование исследуемого образца ВВ проводилось с помощью двух протяженных зарядов-инициаторов из ВВ на основе тэна через демпфирующую прокладку из оргстекла. Давление инициирующей УВ варьировалось за счет изменения толщины демпфирующего слоя. Профиль нагружающего импульса регистрировался с помощью манганиновых датчиков М1 и М2, которые располагались между демпфером

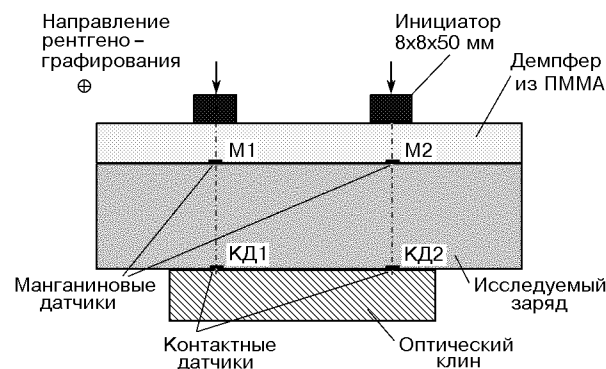


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки

и исследуемым зарядом. Инициаторы срабатывали в разное время, что позволяло получить при однокадровом режиме съемки две фазы процесса. Точное время начала нагружения ВВ под каждым из инициаторов определялось по моментам срабатывания манганиновых датчиков. Моменты выхода ударной (детонационной) волны на нижнюю поверхность заряда под каждым инициатором фиксировались с помощью контактных датчиков КД1 и КД2.

Исследуемый заряд представлял собой шашку размером 120×20 (30) мм и толщиной в направлении рентгенографирования 45 мм. Исследуемый образец устанавливался на шашку из того же взрывчатого состава диаметром 60 мм, которая служила оптическим клином. С его помощью происходит сопоставление значений плотности почернения рентгеновской пленки D и оптической толщины просвечиваемого объекта $z = \rho L$, где ρ — плотность, L — размер образца в направлении рентгенографирования.

Одни из первых результатов измерения сжатия инертного вещества на фронте УВ рентгенографическим методом были получены Руди Шаллем в 1950 г. [3]. Исследуемый объект (брусек 10×10 мм) рентгенографировался вместе со ступенчатым эталоном, выполненным из того же материала. Автором исследовалось сжатие легких материалов (Mg и Al) на фронте УВ в металлических брусках, примыкавших к заряду ВВ равного сечения.

В настоящее время появилось много работ, в которых исследовалось состояние вещества за фронтом ударной (детонационной) волны с помощью излучений разного вида [4–7]. Главным образом они посвящены проблеме определения плотности вещества за фронтом детонационной волны (ДВ) или инициирующей УВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И РАСЧЕТОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Профиль нагружающего импульса измерялся с помощью манганинового датчика. Чувствительный элемент датчика представлял собой полоску манганиновой фольги размером $8 \times 0,5$ мм и толщиной 0,03 мм. В опытах датчики помещались во фторопластовую изоляцию толщиной 0,015 мм. При определении профиля нагружения в цилиндрической инициирующей УВ активный элемент датчика размещался вдоль линии инициирования. Конструкция датчика и размещение его чувствительно-

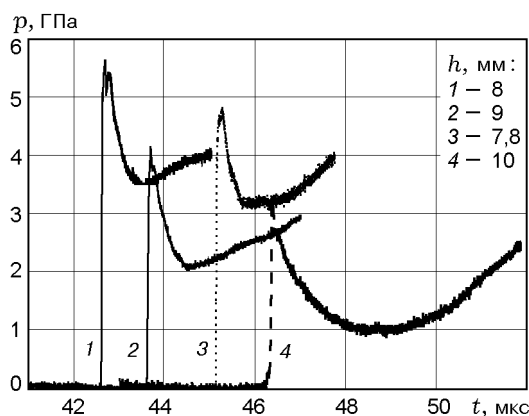


Рис. 2. Профили нагружающего давления при разной толщине демпфера:

1, 2 — ВВ на основе октогена, 3, 4 — ВВ на основе гексогена

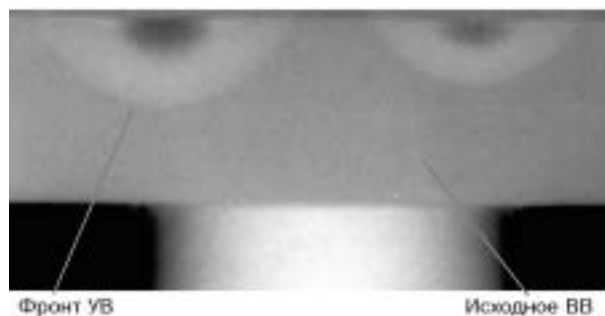


Рис. 3. Рентгенограмма опыта с ВВ на основе октогена:

$h = 9$ мм, отказ детонации

го элемента относительно фронта инициирующей УВ приводят к минимальному растяжению датчика и уменьшают влияние этого фактора на измерение давления.

На рис. 2 приведены профили нагружающего давления при разной толщине демпфера h для различных ВВ. Профили нагружающего давления характерны для нестационарной инициирующей УВ. За фронтом на зависимостях $p(t)$ наблюдается рост давления, связанный, скорее всего, с началом разложения ВВ.

На рис. 3 приведена рентгенограмма опыта, в котором в момент рентгенографирования не был зафиксирован переход ударной волны в детонационную для ВВ на основе октогена. На рентгенограмме видны область невозмущенного ВВ, фронты УВ, прошедших в моменты рентгенографирования разные расстояния, и область ВВ, сжатого за фронтом УВ (более светлая зона на рентгенограмме). За свет-

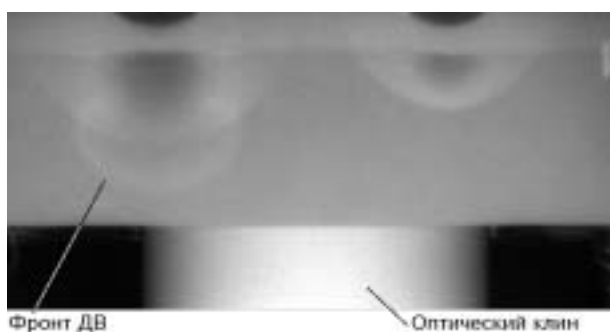


Рис. 4. Рентгенограмма опыта с ВВ на основе гексогена:

$h = 7,8$ мм, переход к детонации

лой зоной на снимке располагается более темная область. Плотность почернения рентгенопленки в этой зоне выше, чем на изображении исходного ВВ, что может свидетельствовать о его разложении.

На рис. 4 приведена рентгенограмма опыта, в котором в момент рентгенографирования зафиксирован переходный режим взрывчатого превращения для ВВ на основе гексогена. Фронт УВ трансформируется во фронт ДВ.

На рис. 5 приведены $x-t$ -диаграммы распространения фронтов УВ и ДВ при разной толщине демпфера для различных ВВ. Полученная зависимость показывает, что для ВВ на основе октогена при толщине демпфера $h = 9$ мм, которой соответствует максимальное давление на фронте $p_{\max} \approx 4,0$ ГПа, взрывчатое превращение не переходит в детонацию. Скорость фронта УВ уменьшается по мере распространения по ВВ.

При $h = 8$ мм (и соответственно $p_{\max} \approx 5,5$ ГПа) зафиксирован переход УВ в детонацию. Через точки на $x-t$ -диаграмме, соответствующие моментам выхода волн из образца, проведены две прямые, ограничивающие зону перехода УВ в ДВ. На глубине $\approx 9,5 \div 12$ мм (точка излома на $x-t$ -диаграмме) фронт УВ трансформировался во фронт ДВ. Задержка возбуждения детонации, определяемая точкой пересечения детонационной прямой $x-t$ -диаграммы с осью времени t [8], составила $\approx 1,45 \div 2,0$ мкс.

Для ВВ на основе гексогена при $h = 10$ мм (и соответственно $p_{\max} \approx 3,2$ ГПа) взрывчатое превращение не переходит в детонацию. Скорость фронта УВ уменьшается по мере распространения по ВВ.

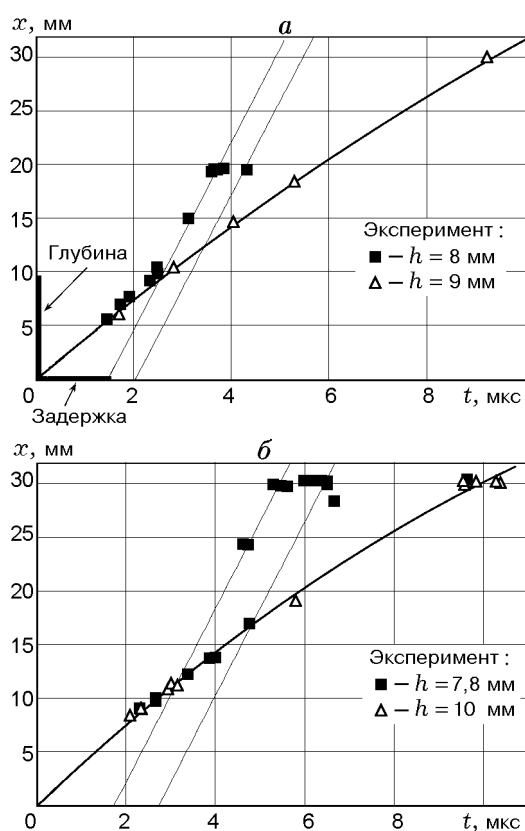


Рис. 5. $x-t$ -Диаграмма распространения фронтов УВ (ДВ):

толстая сплошная линия — суммарная зависимость, построенная по результатам всех опытов методом наименьших квадратов

При $h = 7,8$ мм ($p_{\max} \approx 4,7$ ГПа) зафиксирован переход УВ в детонацию. На глубине $\approx 11,5 \div 17$ мм фронт УВ трансформировался во фронт ДВ. Задержка возбуждения детонации составила $\approx 1,7 \div 2,6$ мкс.

Метод определения профиля плотности основан на связи плотности почернения рентгенопленки и оптической толщины просвечиваемого объекта $z = \rho L$. По выделенному направлению на изображении исследуемого объекта строится микрофотограмма $D(x)$. С помощью эталонной зависимости $D(z)$, полученной рентгенографированием оптического клина, строилась зависимость $z(x)$ — распределение оптической толщины по координате. Распределение плотности $\rho(x)$ находили из соотношения $\rho(x) = z(x)/L$. В этом соотношении в явном виде не учитывается влияние разгрузки на точность восстановления распределения плотности.

Оценим влияние разлета вещества с тор-

цевых поверхностей на определение профиля плотности. Для этого обратимся к рис. 6. Из рисунка видно, что ослабление рентгеновского луча за фронтом инициирующей УВ происходит за счет прохождения зон вещества, охваченных разгрузкой (3), и области вещества, не охваченной разгрузкой (4). В зонах 3 плотность меняется от значения ρ_n (искомая величина) на границе области 4 до нуля, т. е. существует некое распределение плотности по длине. Вдоль рентгеновского луча неважно знать, каков функциональный вид этого распределения (так как ослабление излучения зависит от средней плотности на длине L_p), которое в линейном приближении можно определить как $\rho_p = \rho_n/2$.

Выражение для оптической толщины z за фронтом УВ имеет вид

$$z = 2L_p\rho_p + L_n\rho_n, \quad (1)$$

где L_p — размер области разгрузки; ρ_p — плотность в этой области; L_n и ρ_n — аналогичные значения для зоны, не охваченной разгрузкой. Подставляя $\rho_p = \rho_n/2$ в (1), получаем

$$z = \rho_n(L_p + L_n). \quad (2)$$

Предполагая картину разлета вещества в областях 3 (см. рис. 6) симметричной, имеем

$$L = L_p + L_n. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получаем

$$z = \rho_n L, \quad (4)$$

откуда

$$\rho_n = z/L. \quad (5)$$

Таким образом, использование соотношения $\rho(x) = z(x)/L$ означает, что плотность определяется изменением величины ослабления излучения в каждой точке по сравнению с величиной ослабления в невозмущенной зоне обреза.

В реальном случае (с волнами разгрузки с торцевых поверхностей) тот же подход означает, что ослабление излучения на пути длиной $2L_p + L_n$ с соответствующими плотностями эквивалентно ослаблению излучения на пути L с искомой плотностью ρ_n . Такой же подход для определения зависимости $\rho(t)$ реализован в работах [4, 5].

На рис. 7 представлены профили плотности, определенные по линии, вдоль которой

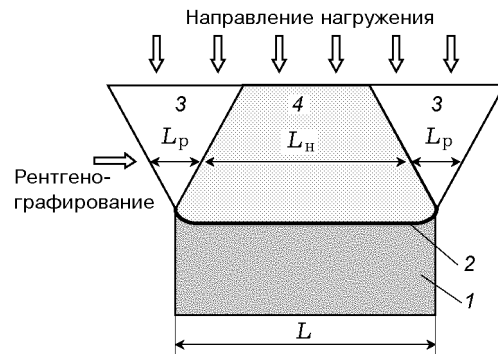


Рис. 6. Схема нагружения:

1 — неагруженное ВВ, 2 — фронт УВ (ДВ), 3 — область, охваченная разгрузкой, 4 — область, не охваченная разгрузкой

проводилось нагружение ВВ при $h = 9$ и 8 мм для ВВ на основе октогена. Координата $x = 0$ соответствует нагружаемой поверхности ВВ. Значения времени, указанные на графике, отсчитываются от момента входа инициирующей УВ в заряд ВВ. Из рис. 7 видно, что в случае отказа детонации по мере распространения УВ увеличивается слой сжатого вещества, толщина которого определялась как ширина профиля плотности на полувысоте. Плотность вещества за фронтом УВ в области сжатия изменяется незначительно и составляет $\approx 2,0$ г/см³.

При переходе УВ в ДВ полученные зависимости отличаются от данных опытов, в которых отсутствовала детонация (см. рис. 7). По мере распространения УВ, с одной стороны, увеличивается плотность вещества за фронтом, достигая значения $\approx 2,13$ г/см³, с другой стороны, уменьшается зона, в которой плотность вещества выше, чем у исходного ВВ.

Аналогичные закономерности в эволюции профилей плотности при отказе детонации и переходном режиме наблюдаются для ВВ на основе гексогена (рис. 8).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В опытах для разных ВВ на экспериментальных зависимостях $\rho(x)$ можно выделить несколько характерных областей: невозмущенное ВВ, сжатое вещество, зона резкого снижения плотности. За фронтом УВ находится слой сжатого вещества шириной несколько миллиметров и, как отмечалось ранее, при отказе детонации по мере распространения взрывчатого превращения происходит его увеличение. При

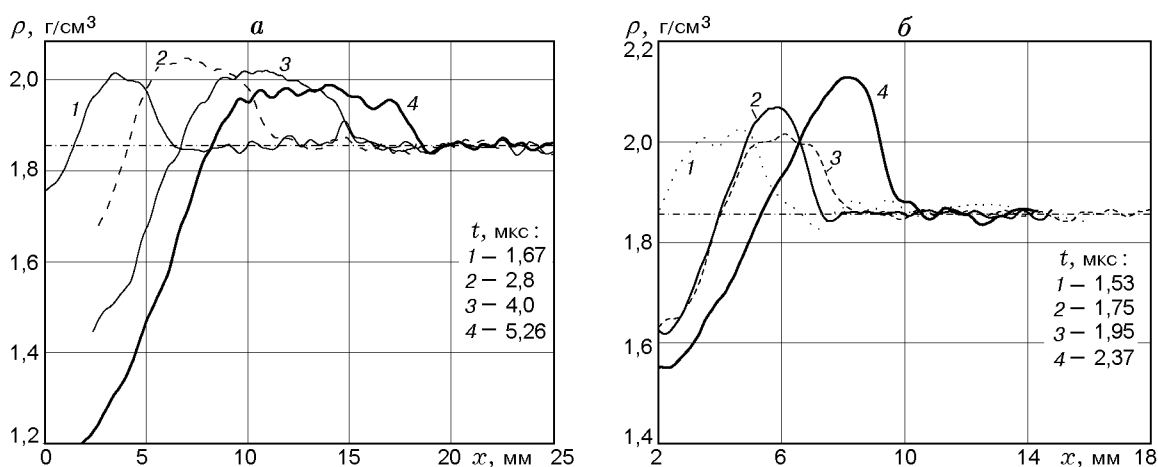


Рис. 7. Распределение плотности вещества за фронтом УВ для ВВ на основе октогена: *a* — $h = 9$ мм, отказ детонации, *б* — $h = 8$ мм, переход к детонации; штрихпунктирная линия — начальная плотность

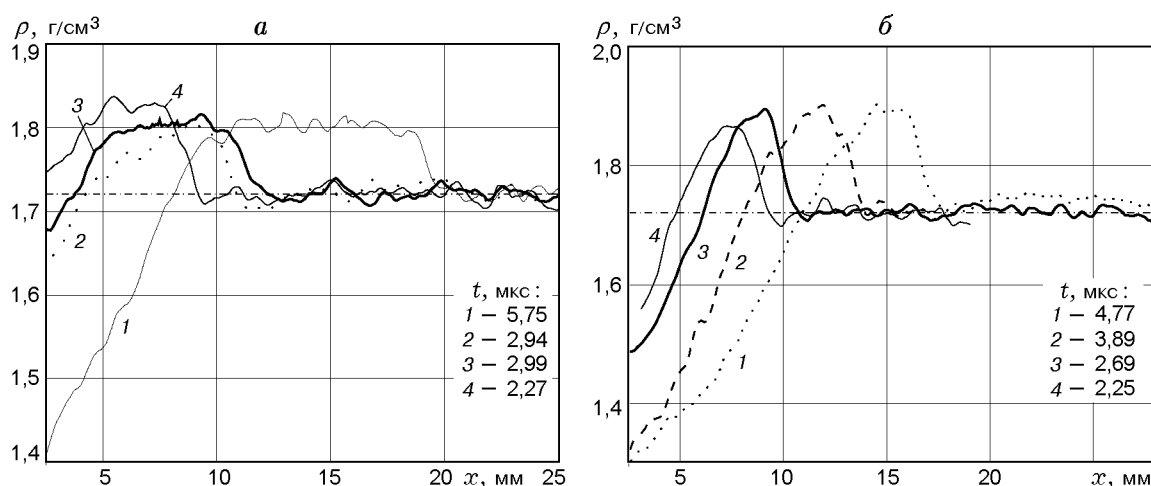


Рис. 8. Распределение плотности вещества за фронтом УВ для ВВ на основе гексогена: *a* — $h = 10$ мм, отказ детонации, *б* — $h = 7,8$ мм, переход к детонации; штрихпунктирная линия — начальная плотность

этом значение плотности в этой области практически не меняется (см. рис. 7, 8). За этой областью располагается зона, в которой плотность вещества резко уменьшается, что может быть связано с образованием продуктов реакции. Насколько полно произошло разложение ВВ, сказать невозможно, поскольку в указанной области присутствует и непрореагировавшее ВВ.

Размер области ВВ, сжатого за фронтом УВ, зависит от скорости химического разложения, которая определяется начальной интенсивностью УВ. Чем она выше, тем раньше и быстрее происходит разложение и тем ближе зона разлета продуктов располагается к фрон-

ту УВ. На рис. 9 представлены зависимости, отражающие изменение размера области сжатия за фронтом при отказе детонации для ВВ на основе октогена и гексогена. Из рисунка видно, что область сжатого вещества увеличивается во времени (заштрихованная область).

При увеличении давления в инициирующей УВ до $\approx 5,5$ ГПа для ВВ на основе октогена и до $\approx 4,7$ ГПа для ВВ на основе гексогена в опытах зарегистрирован переходный режим взрывчатого превращения. При близком максимальном значении давления в нагружающей УВ глубина возбуждения детонации в ВВ на основе октогена и гексогена разная, что связано с различной ударно-волновой чувстви-

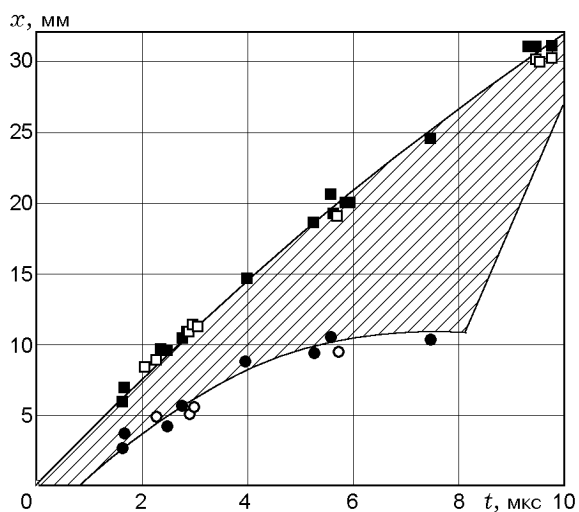


Рис. 9. Эволюция фазы сжатия вещества за фронтом УВ при отказе детонации для ВВ на основе октогена и гексогена:

■, ● — ВВ на основе октогена, □, ○ — ВВ на основе гексогена; ■, □ — фронт УВ, ●, ○ — конец фазы сжатия

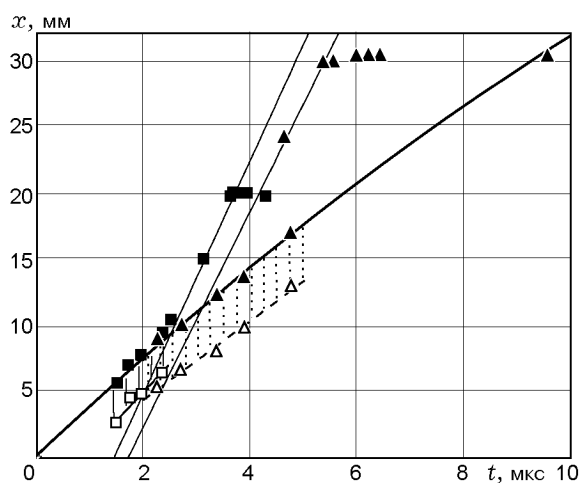


Рис. 10. Эволюция фазы сжатия вещества за фронтом УВ при возбуждении детонации для ВВ на основе октогена и гексогена:

■, □ — ВВ на основе октогена, ▲, △ — ВВ на основе гексогена; ■, ▲ — фронт УВ и ДВ, □, △ — конец фазы сжатия

ностью этих взрывчатых составов.

При переходе инициирующей УВ в детонацию течение за фронтом претерпевает некоторые изменения. На рис. 10 представлены зависимости, которые отражают изменение размера сжатого слоя за фронтом при возбуждении детонации для ВВ на основе октогена и гексогена. Расположение экспериментальных точек на рисунке указывает на то, что область сжатого вещества для ВВ на основе октогена уменьшается со временем, для ВВ на основе гексогена — не изменяется (экспериментальные точки, соответствующие концу фазы сжатия, расположены практически параллельно положению фронта УВ). Это является отличительной характеристикой развития взрывчатого превращения, которое переходит либо не переходит в детонацию.

Кроме того, плотность вещества за фронтом инициирующей УВ, переходящей в детонацию, растет со временем и по своему абсолютному значению больше, чем при отказе детонации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обработки рентгенограмм получены зависимости $\rho(x)$, которые состоят из нескольких характерных участков: зона исходного ненагруженного ВВ; область сжатого

за фронтом УВ вещества; зона, где происходит резкое снижение плотности.

Установлены особенности эволюции профиля плотности за фронтом расходящейся инициирующей УВ, которая либо не переходит, либо переходит в детонацию.

В случае, когда УВ не переходит в детонацию:

- профиль плотности за фронтом УВ имеет характерную особенность — участок, в котором плотность сжатого вещества постоянна;
- при распространении фронта волны в глубь образца размер слоя сжатого вещества увеличивается;
- плотность вещества за фронтом УВ не растет.

Эти особенности эволюции профиля плотности реализуются при нагружении расходящейся УВ со следующими значениями амплитуды давления: для ВВ на основе октогена при $p \lesssim 4,0$ ГПа; для ВВ на основе гексогена при $p \lesssim 3,2$ ГПа.

В случае, когда УВ переходит в детонацию:

- профиль плотности за фронтом УВ, формирующей ДВ, не имеет ярко выраженного участка сжатого вещества с постоянной плотностью;
- при движении фронта УВ в глубь образца размер сжатого слоя не увеличивается;
- плотность за фронтом инициирующей

УВ растет, вплоть до формирования стационарной ДВ.

Такие особенности в эволюции профиля плотности реализуются при нагружении расходящейся УВ со следующими значениями амплитуды давления: для ВВ на основе октогена при $p \gtrsim 5,5$ ГПа; для ВВ на основе гексогена при $p \gtrsim 4,7$ ГПа.

Большой объем новой количественной информации позволит в двумерных газодинамических расчетах оценить возможность использования различных моделей кинетики взрывчатого превращения, провести уточнение уравнений состояния ВВ, продуктов взрыва и их смеси для построения физически более обоснованной модели возбуждения детонации в гетерогенных ВВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комрачков В. А., Ковтун А. Д., Макаров Ю. М. Применение импульсной рентгенографии для исследования ударно-волнового инициирования ТАТБ // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 2. С. 96–101.
2. Комрачков В. А., Панов К. Н., Фролова Т. И. Определение плотности вещества за фронтом инициирующей ударной волны в ВВ на основе ТАТБ рентгенографическим методом // Химическая физика процессов горения и взрыва: 12-й Симпозиум по горению и взрыву. Черноголовка: ИПХФ РАН, 2000. Ч. II. С. 141–144.
3. Rudi Schall. Untersuchungen an Detonationsstößen in Leichtmetallen zur Bestimmung der Zustandsgleichung der Metalle // Z. angew. Phys. 1950. Bd II, Heft 6.
4. Зубков П. И., Кулипанов Г. Н., Лукьянчиков Л. А. и др. Измерение плотности вещества за фронтом ударных и детонационных волн с помощью синхротронного излучения // III Харитоновские тематические научные чтения: Междунар. конф. Саров: ВНИИЭФ, 2001. С. 306–311.
5. Зубков П. И., Кулипанов Г. Н., Лукьянчиков Л. А. и др. Наблюдение переходных процессов в малоплотных ВВ с помощью синхротронного излучения // V Харитоновские тематические научные чтения: Междунар. конф. Саров: ВНИИЭФ, 2003. С. 204–208.
6. Zumbro J. D., Adams K. J., Alrick K. R., et al. Proton radiography of the detonation front in HE systems // 11th Symp. (Intern.) on Detonation. Colorado, 1998. P. 54.
7. Mader C. L., Zumbro J. D., and Ferm E. N. Proton radiographic and numerical modeling of colliding, diverging PBX-9502 detonations // 12th Symp. (Intern.) on Detonation. San Diego, California, 2002. P. 1040.
8. Ramsay J. B., Popolato A. Analysis of shock initiation of detonation in liquid explosives // 4th Symp. (Intern.) on Detonation. Washington, 1965. P. 233–238.

Поступила в редакцию 17/VII 2003 г.,
в окончательном варианте — 3/XII 2003 г.