

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ ВО ВЗРЫВЧАТОМ ВЕЩЕСТВЕ НА ПРОТОННОМ УСКОРИТЕЛЕ У-70

В. В. Бурцев, А. Л. Михайлов, К. Н. Панов, А. В. Руднев, М. А. Сырунин

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва
607188 Саров, root@gdd.vniief.ru

Радиографическим методом на протонном ускорителе У-70 исследован процесс возбуждения детонации в смесевом взрывчатом составе на основе октогена и ТАТБ при нагружении расходящейся ударной волной. Получены распределения плотности за фронтом инициирующей ударной волны в различные моменты времени. На образце из пластифицированного ТАТБ радиографическим методом исследован процесс срыва детонации при столкновении ударной и детонационной волн. Полученные изображения позволили определить характерные особенности развития взрывчатого превращения при ударно-волновом нагружении.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, ударная волна, детонация, радиография, инициирование ВВ, распределение плотности, десенсибилизация.

ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях переходных процессов взрывчатого превращения при ударно-волновом нагружении взрывчатых веществ (ВВ) наряду с электроконтактной, манганиновой, электромагнитной методиками широко применяются бесконтактные методики, в которых используются излучения разного вида: радиоволны миллиметрового диапазона [1], протоны [2–4], рентген [5, 6], синхротронное излучение [7].

Визуализация процесса позволяет определить форму и положение фронтов ударных (УВ) и детонационных волн (ДВ), а также зон непрореагировавшего вещества и т. д. Это особенно важно при двумерной картине процесса. Областью исследований могут быть процессы в ВВ после повторных и неоднократных нагружений с возможными промежуточными фазами разгрузки, взаимодействие УВ и ДВ, возбуждение детонации при столкновениях, отражениях и других неоднородных процессах, когда получение данных другими экспериментальными методиками практически невозможно. Результаты, представляемые в виде изображений, дают возможность напрямую проводить сравнение с результатами численного моделирования.

Сложность исследования переходных процессов состоит в том, что колебания неконтролируемых параметров в экспериментальном блоке влияют на результат взрывного эксперимента. Можно сказать, что каждый опыт уникален по-своему. Поэтому в одном эксперименте необходимо получать как можно больше

информации разными методиками для однозначной интерпретации отклика ВВ на ударно-волновое воздействие.

Ускоритель протонов У-70, используемый в Институте физики высоких энергий для исследования возбуждения детонации, дает уникальную возможность получать до 29 кадров взрывного процесса. Кроме того, при проведении опытов возможно совместное использование традиционных экспериментальных методик.

Целью работы является исследование ударно-волнового инициирования детонации во взрывчатом веществе на протонном ускорителе У-70.

ПОСТАНОВКА ОПЫТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Радиографическая установка ускорителя протонов имеет следующие параметры: энергия протонов 50 ГэВ; диаметр поля обзора ≈ 60 мм; длительность банча протонов на полувывоте $20 \div 30$ нс; интенсивность в импульсе $\approx 10^{11} \div 10^{13}$ протонов. Пространственное разрешение методики составляет 0.25 мм, временное — $20 \div 30$ нс [8]. На рис. 1 представлена схема экспериментальных блоков. Радиографирование блоков выполнялось перпендикулярно плоскости рисунка. В опытах на ускорительном комплексе использовалась взрывозащитная камера. Регистрация протонографических изображений проводилась с помощью модульной многокадровой электронно-оптической системы на основе ПЗС-матриц.

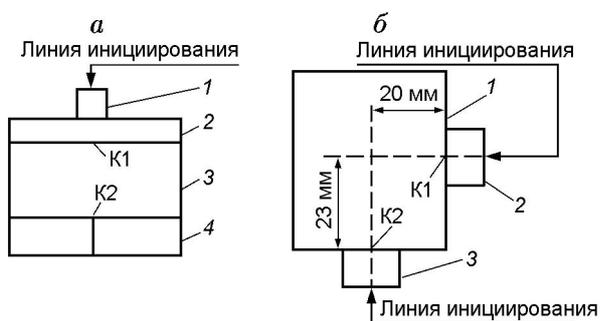


Рис. 1. Схема экспериментальных блоков:

a — опыт 1: 1 — инициатор, 2 — демпфер, 3 — образец взрывчатого состава, 4 — «оптический» клин; *b* — опыт 2: 1 — образец ТАТБ, 2 — инициатор УВ, 3 — инициатор ДВ

В опыте 1 исследовался процесс возбуждения детонации в смесевом взрывчатом составе (ТАТБ и октоген) при нагружении цилиндрической расходящейся УВ. Схема нагружения, используемая в опыте, описана в работе [5].

Образец взрывчатого состава толщиной 20 мм и начальной плотностью $\rho_0 = 1.887 \text{ г/см}^3$ нагружался через демпфер из ПММА толщиной 6 мм расходящейся ударной волной от протяженного заряда-инициатора из пластического ВВ сечением $8 \times 8 \text{ мм}$. Детонация к инициатору подводилась посредством пластины того же пластического ВВ шири-

ной 1 мм, которая в свою очередь инициировалась линейным генератором ДВ. Размер образца в направлении радиографирования составлял 75 мм.

Для определения распределения плотности за фронтом инициирующей УВ в экспериментальной блоке устанавливался оптический клин из того же взрывчатого состава, представляющий собой ромб с диагоналями 45 и 90 мм.

Для определения момента времени выхода УВ на поверхность образца в сборку включены контактные датчики (К1, К2). Момент выхода УВ на поверхность образца принят за начало процесса $t_{K1} = 0$, при этом $t_{K2} = 3.27 \text{ мкс}$.

В эксперименте зарегистрированы протонографические изображения десяти (№ 1 ÷ 10) фаз взрывного процесса. Для устранения неоднородности, обусловленной неравномерным распределением протонов по площади регистрации, использовалось изображение поля излучения, полученное в специальном невзрывном эксперименте. Скорректированные изображения и моменты регистрации, отсчитанные от момента нагружения образца, приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что возбуждение детонации произошло из небольшой области. При этом образуются так называемые темные или «мертвые» (dead) зоны, в которых вещество

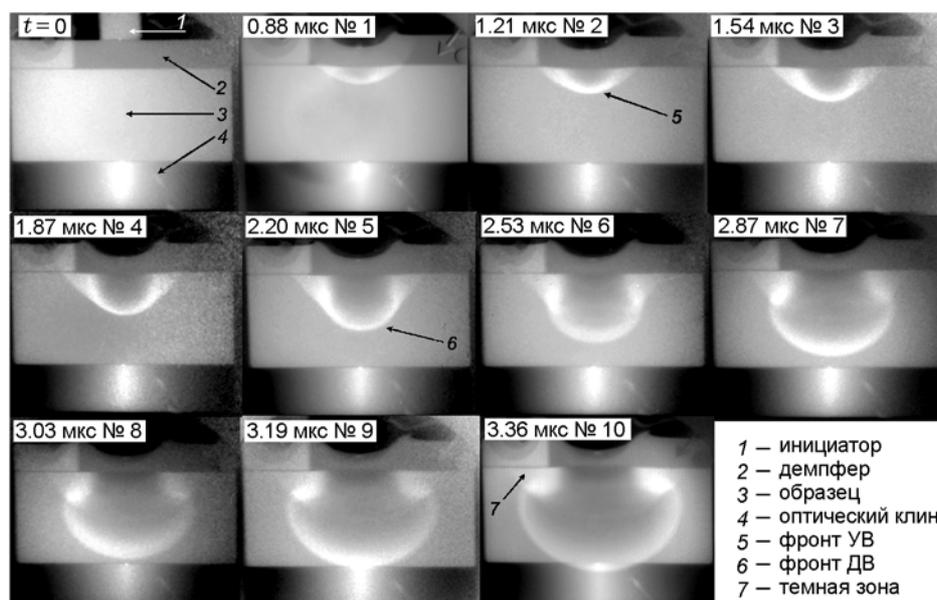


Рис. 2. Фотографии взрывного процесса в опыте 1

сжато, но не реагирует. Фронт ДВ огибает область сжатого в УВ вещества, при этом контактная граница «сжатое вещество — продукт взрыва» отчетливо видна на снимках. То есть в скользящем режиме детонация не инициирует сжатое ударной волной вещество и не проходит в эту область.

Процесс инициирования детонации, зафиксированный в опыте, является характерным для ударно-волнового нагружения гетерогенных ВВ. При нагружении ВВ за фронтом УВ через некоторое время образуются продукты разложения (темная область на снимках). Расширяясь, они действуют как поршень и сжимают вещество перед собой, образуя волну сжатия. Волна сжатия, распространяясь по уплотненному ударной волной веществу, догоняет фронт УВ, усиливает его, что и приводит к инициированию детонации. В данном случае (при инициировании детонации расходящейся УВ) процесс проходит быстро и детали его не видны на изображениях. Более подробно этот процесс исследован в работе [9].

На рис. 3 представлены положения фронтов УВ и ДВ, полученные по изображениям и приведенные с учетом коэффициента увеличения к истинным размерам. Координата $Y = 0$ соответствует плоскости симметрии сборки, координата $X = 0$ — нагружаемой поверхности образца.

На рис. 4 приведена $X-t$ -диаграмма распространения фронта УВ и ДВ по образцу смесового взрывчатого состава, построенная по экспериментальным данным. Время отсчи-

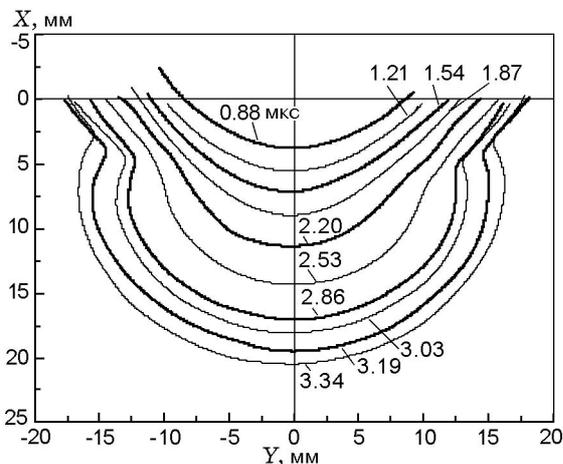


Рис. 3. Форма и положение фронтов УВ и ДВ в опыте 1

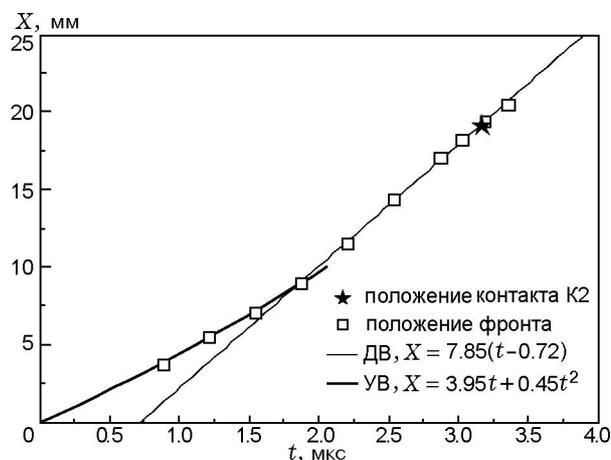


Рис. 4. $X-t$ -диаграмма распространения фронтов УВ и ДВ

тывалось от начала нагружения образца. Через экспериментальные точки, соответствующие ДВ, методом наименьших квадратов построена прямая. Полученное значение скорости 7.85 км/с соответствует скорости нормальной детонации для данного взрывчатого состава. Начальные фазы процесса соответствуют росту скорости фронта УВ по закону $W = 3.95 + 0.9t$. По $X-t$ -диаграмме определено, что ударная волна трансформировалась в детонационную на глубине ≈ 8.7 мм в момент времени ≈ 1.88 мкс. Фазы № 1–3 на рис. 2 соответствуют ударной волне, фазы № 4–10 — детонации.

По полученным изображениям определяли распределение плотности за фронтом. В эксперименте для построения калибровочной зависимости $D(z)$ использовались изображения оптического клина. Метод определения плотности изложен в работе [5].

На рис. 5 представлены профили плотности $\rho(x)$, определенные вдоль линии, перпендикулярной нагружаемой поверхности исследуемого образца. Координата $X = 0$ соответствует нагружаемой поверхности образца.

Плотность вещества за фронтом в сформированной ДВ (фаза № 5, $t = 2.20$ мкс) ниже расчетных оценок в точке Жуге в приближении кубического уравнения состояния продуктов взрыва $\rho_J = 4/3\rho_0 = 2.5$ г/см³ (экстраполированная зависимость проведена штриховой линией). Расхождение связано с тем, что детонация возникает не по всей длине фронта УВ в направлении радиографирования: из-за разгрузки с краев образца периферийные участ-

ки отстают от остальной части фронта (процесс становится трехмерным). По мере развития детонации фронт ДВ охватывает весь образец. При этом плотность вещества за фронтом растет, приближаясь к плотности вещества за

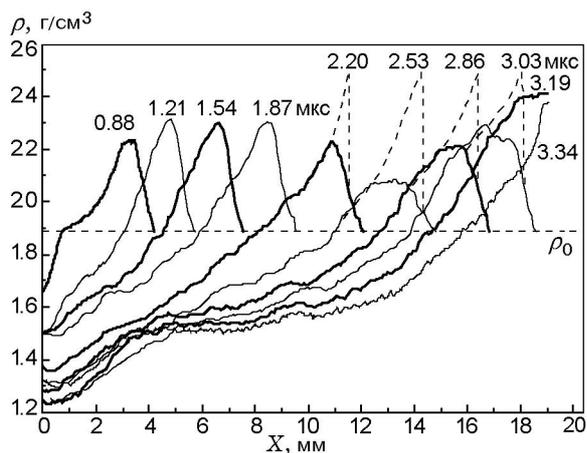


Рис. 5. Распределение плотности вещества за фронтом в различные моменты времени

фронтом стационарной ДВ.

В опыте 2 исследовался известный процесс затухания детонации в пластифицированном ТАТБ при ее входе в область предварительно сжатого ударной волной вещества [10].

Образец из пластифицированного ТАТБ размером 40×50 мм и начальной плотностью $\rho_0 = 1.907$ г/см³ нагружался двумя инициаторами. Инициатор УВ сечением 15×10 мм из пластического ВВ формировал в образце расходящуюся цилиндрическую ударную волну, а инициатор ДВ сечением 15×10 мм из более мощного ВВ — расходящуюся детонационную волну. Радиографирование макета проводилось вдоль образующих детонационной и ударной волн. Время начала нагружения образца от разных инициаторов определялось с помощью контактных датчиков К1 и К2. Момент нагружения образца инициатором УВ принят за начало процесса $t_{К1} = 0$, при этом $t_{К2} = 3.83$ мкс. Размер образца из пластифицированного ТАТБ в направлении радиографирования составлял 60 мм.

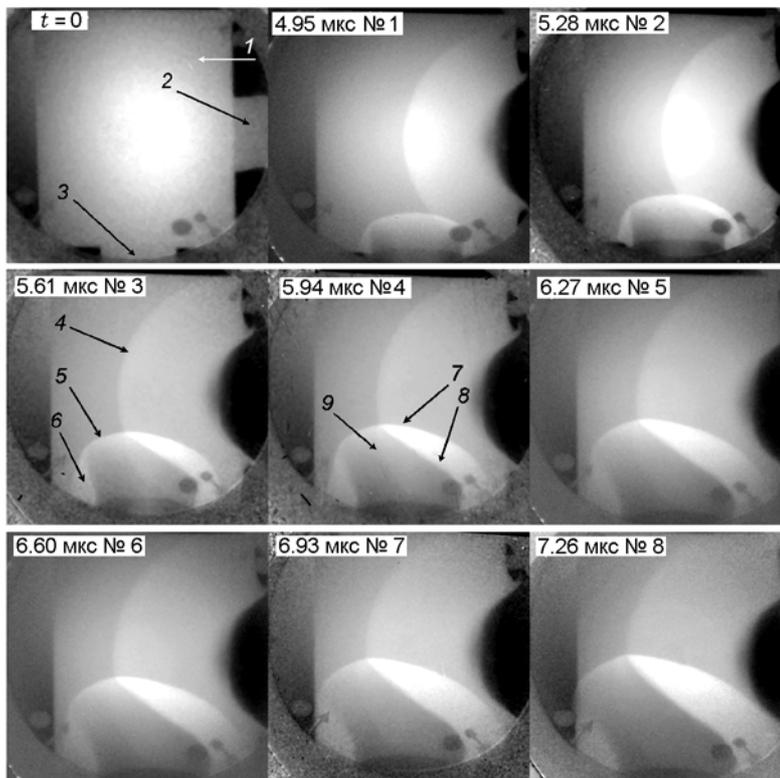


Рис. 6. Фотографии взрывного процесса в опыте 2:

1 — образец, 2 — инициатор УВ, 3 — инициатор ДВ, 4 — фронт УВ, 5 — фронт ДВ, 6 — «темная» зона, 7 — фронт УВ в сжатой области, 8 — контактная граница, 9 — фронт УВ в продуктах взрыва

Полученные в опыте изображения и моменты их регистрации, отсчитанные от момента нагружения образца инициатором УВ, приведены на рис. 6. Видно, что как только детонация входит в область ударно-сжатого вещества, происходит ее срыв с образованием классической картины распада разрыва при столкновении волн. В сжатую ударной волной область начинает распространяться УВ, а не детонация. Это видно как по уменьшению скорости волны, так и по отсутствию продуктов взрыва начиная от фронта и до контактной границы (нет характерного спада плотности, как за фронтом ДВ). В область, занятую продуктами, распространяется фронт УВ.

На рис. 7 показана динамика движения контуров характерных границ в опыте (фронт ДВ, границы темной зоны, фронт УВ в продуктах взрыва, контактная граница, фронт УВ, фронт УВ в сжатой области), полученные по изображениям и приведенные с учетом коэффициента увеличения к истинным размерам. Координаты $Y = 0$, $X = 0$ соответствуют правому нижнему углу образца ТАТБ.

На рис. 8 приведена $X-t$ -диаграмма распространения УВ и ДВ по пластифицированному ТАТБ. Время отсчитывалось от нача-

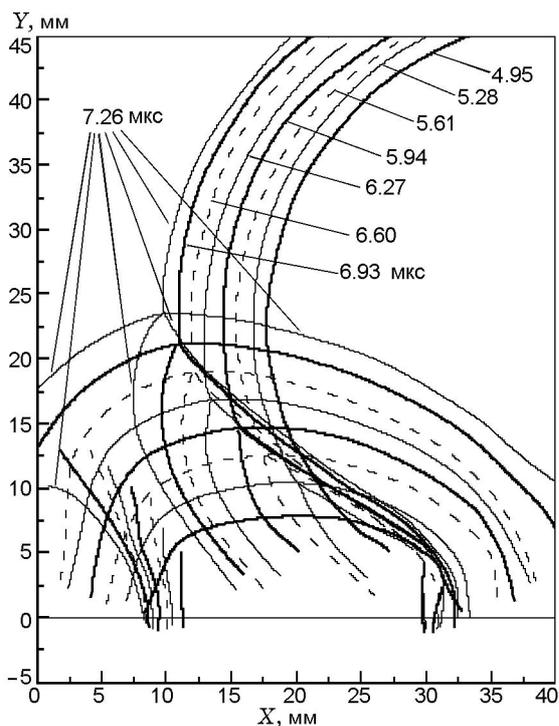


Рис. 7. Контурные характерные области в опыте 2

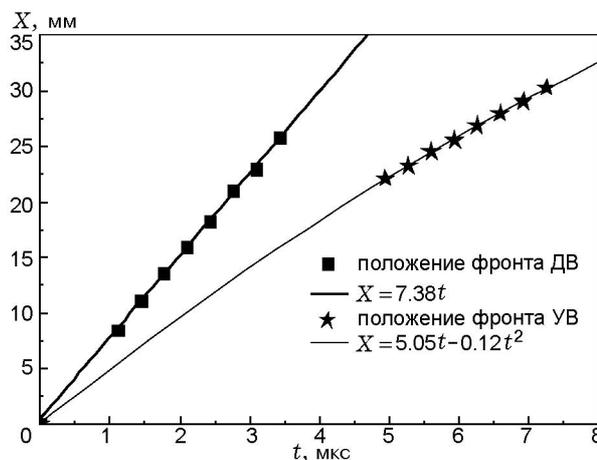


Рис. 8. $X-t$ -диаграмма распространения фронтов УВ и ДВ в опыте 2

ла нагружения образца. Через экспериментальные точки, соответствующие ДВ, методом наименьших квадратов построена прямая. Получено значение скорости 7.38 км/с. На графике зависимость выходит из начала координат, что свидетельствует об отсутствии задержки возбуждения детонации при иницировании.

Из зависимости, соответствующей скорости распространения УВ (см. рис. 8), видно, что ударная волна по мере распространения по образцу затухает. При этом скорость фронта уменьшается от ≈ 5 до ≈ 3.4 км/с.

В опыте 2 распределение плотности не определялось.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В экспериментах использовались протяженные сборки. Образцы ВВ нагружались расходящимися УВ. При этом просвечивание происходит вдоль образующей фронта УВ (ДВ), что дает большую контрастность изображения. Этот прием неоднократно применялся в рентгенографических экспериментах [5]. Большая просвечивающая способность протонного ускорителя позволяет проводить эксперименты с образцами большой протяженности вдоль направления радиографирования, что снижает влияние боковой разгрузки. Картина процесса в этом случае близка к двумерной, что важно при сравнении результатов опыта и численного моделирования.

Качество полученных изображений не хуже, чем при использовании рентгенографической методики. К сожалению, на точность

определения плотности вещества сильное влияние оказывает исходная неравномерность распределения протонов по полю регистрации. Полностью избавиться от этого фактора пока не удалось. Этим вызвана большая погрешность определения плотности, чем при использовании рентгенографического метода.

В работах [2, 3, 6] экспериментальные сборки имеют ось симметрии. В этом случае радиографирование происходит по касательной к фронту УВ или ДВ, что снижает контрастность получаемых изображений. Распределение плотности вещества находится с помощью преобразования Абеля. В этом случае из-за особенности методики решения некорректной задачи вблизи оси симметрии возникает значительная погрешность. Как правило, в работах [2, 3, 6] распределения плотности вещества приведены именно по оси сборки, где погрешность максимальна. В случае протяженной сборки указанного недостатка нет. Плотность вещества за фронтом волны определяется по упрощенной формуле $\bar{\rho}(x) = Z(x)/L_0$, где Z — оптическая толщина, L_0 — начальный размер образца в направлении радиографирования. При этом погрешность связана главным образом с влиянием боковой разгрузки с торцевых поверхностей заряда и носит систематический характер. Погрешность можно учесть расчетным способом или свести к минимуму, используя заряд большой протяженности вдоль направления радиографирования.

В опыте 1, где исследовалось инициирование смесового состава на основе ТАТБ и октогена, получена подробная (10 фаз) эволюция профиля плотности. В центральной части изображений диаметром ≈ 30 мм, где определялись профили плотности, остаточная неравномерность незначительна. Распределения плотности в различные моменты времени хорошо согласуются между собой. По оценкам авторов статьи погрешность определения плотности вещества не превышает $\approx 5 \div 10$ %.

В опыте 2 исследовался срыв детонации при ее распространении по ударно-сжатому пластифицированному ТАТБ. Аналогичные эксперименты проведены в работе [10]. По-видимому, в ТАТБ существует физический запрет на распространение детонации в сжатую ударной волной область.

Ударно-волновая чувствительность ТАТБ в диапазоне $\rho_0 = 1.89 \div 1.91$ г/см³ сильно зависит от плотности. Соответствующая зависи-

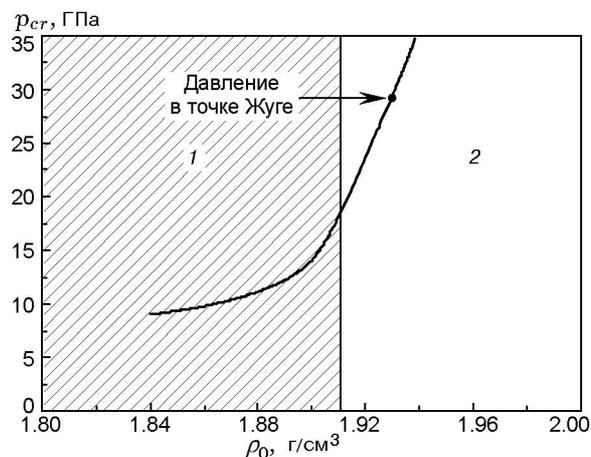


Рис. 9. Зависимость критического давления инициирования от начальной плотности для пластифицированного ТАТБ:

линия — зависимость для пластифицированного ТАТБ, 1 — экспериментальная область, 2 — область экстраполяции

мость представлена на рис. 9 [11]. Видно, что если за фронтом УВ вещество сжимается до плотности ≈ 1.96 г/см³, то давление, необходимое для его инициирования, будет превышать давление в точке Жуге для пластифицированного ТАТБ $p_J \approx 29$ ГПа [12]. Таким образом, детонация не может распространяться в поджатую область.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На ускорительном комплексе протонов У-70 проведены исследования инициирования и развития детонации в гетерогенных ВВ. Получено несколько изображений взрывного процесса в одном опыте. Их качество сравнимо с качеством изображений при использовании рентгенографической методики.

В опыте 1 получен профиль плотности при инициировании детонации расходящейся УВ. Начальные фазы процесса соответствуют росту скорости фронта УВ по закону $W = 3.95 + 0.9t$. По $X-t$ -диаграмме определено, что ударная волна трансформировалась в детонационную на глубине ≈ 8.7 мм в момент времени ≈ 1.88 мкс.

В опыте 2 подробно исследован процесс взаимодействия ударной и детонационной волн в ВВ на основе ТАТБ и зафиксирован срыв детонации при ее входе в область, предварительно поджатую ударной волной.

Данные по форме и положению фронтов УВ и ДВ, $X-t$ -диаграмма распространения фронтов, полученные на протонном ускорителе У-70, пригодны для тестирования численных методик расчета инициирования детонации в гетерогенных ВВ при ударно-волновом нагружении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родионов В. А., Бельский В. М., Богданов Е. Г., Михайлов А. Л., Комиссаров В. В., Седов А. А. Определение глубины возбуждения детонации радиоволновым методом в пластифицированном октогене и ТАТБ // Междунар. конф. «XI Харитоновские тематические научные чтения». — Саров: ВНИИЭФ, 2009. — С. 69–73.
2. Mader C. L., Zumbro J. D., Ferm E. N. Proton radiographic and numerical modeling of colliding, diverging PBX-9502 detonations // Proc. of the 12th Symp. (Intern.) on Detonation, San Diego, California, 2002, Aug. 11–16. — P. 1040.
3. Ferm E. N. Fesseha mariam and LANSCE proton radiography team. Proton radiography observations of the failure of a detonation wave to propagate to the end of a conical explosive charge // Shock Compression of Condensed Matter. — 2005. — P. 968.
4. Голубев А. А., Демидов В. С., Демидова Е. В., Дудин С. В., Канцырев А. В., Колесников С. А., Минцев В. Б., Смирнов Г. Н., Туртиков В. И., Уткин А. В., Фортвов В. Е., Шарков Б. Ю. Диагностика быстропротекающих процессов пучком заряженных частиц от ускорителя ТВН-ИТЭФ // Письма в ЖТФ. — 2010. — Т. 36, № 4. — С. 61–67.
5. Панов К. Н., Комрачков В. А. Исследование рентгенографическим методом эволюции профиля плотности вещества за фронтом расходящейся ударной волны во взрывчатом веществе // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 5. — С. 102–108.
6. Molitoris J. D., Garza R. G., Andreski H. G., Batteux J. D., Souers P. C. An experimental investigation of detonation corner-turning using high resolution radiography // Proc. of the 13th Symp. (Intern.) on Detonation, Maryland, California, 2006, July 23–28. — P. 1040.
7. Зубков П. И., Кулипанов Г. Н., Лукьянчиков Л. А., Ляхов Н. З., Тэн К. А., Титов В. М., Толочко Б. П., Федотов М. Г., Шарфутдинов М. Р., Шеромов М. А. Измерение плотности вещества за фронтом ударных и детонационных волн с помощью синхротронного излучения // Междунар. конф. «III Харитоновские тематические научные чтения». — Саров, ВНИИЭФ, 2001. — С. 306–311.
8. Антипов Ю. М., Афонин А. Г., Василевский А. В. и др. Протонная радиографическая установка на 70 ГэВ ускорителе ГНЦ ИФВЭ // ПТЭ. — 2010. — № 6. — С. 5–12.
9. Панов К. Н., Комрачков В. А., Целиков И. С. Метод исследования кинетики разложения взрывчатого вещества за фронтом ударной волны // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 6. — С. 99–106.
10. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Куратов С. Е., Соколов С. С., Шамраев В. И., Дмитриева Л. В. Теоретическое обоснование феноменологической модели ударно-волновой чувствительности гетерогенного ВВ на основе ТАТБ с учетом одно- и двукратно нагружения, в том числе с промежуточной разгрузкой // Хим. физика. — 1995. — Т. 14, № 2–3. — С. 32–39.
11. Власов Ю. А., Косолапов В. Б., Фомичева Л. В., Хабаров И. П. Влияние температуры, плотности и технологических факторов на ударно-волновую чувствительность пластифицированного ТАТБ // Физика горения и взрыва. — 1998. — Т. 34, № 4. — С. 110–112.
12. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации: пер. с англ. — М.: Мир, 1985.

Поступила в редакцию 24/VI 2010 г.