

УДК 662.215.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ ТАТБ МЕТОДОМ ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ

В. В. Бурцев, В. А. Комрачков, А. Д. Ковтун, К. Н. Панов,
А. В. Руднев, М. А. Сырунин

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва
607190 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

Радиографическим методом исследован процесс возбуждения детонации пластифицированного ТАТБ при ударно-волновом нагружении от накладного заряда-инициатора из взрывчатого состава на основе октогена. В экспериментах варьировался размер инициатора и начальная плотность заряда ТАТБ. При инициировании детонации ТАТБ часть вещества не реагирует, образуя так называемые «темные» зоны. По мере развития процесса детонация огибает «темные» зоны, не инициируя вещество внутри них. Проведено сравнение эволюции площади «темных» зон для образцов разной начальной плотности и для инициаторов различных размеров. По изображениям взрывного процесса построены контуры характерных границ и $X-t$ -диаграммы распространения фронта детонационной волны при разных режимах нагружения. Получены и проанализированы распределения плотности за фронтом расходящейся детонационной волны в различные моменты времени.

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

ВВЕДЕНИЕ

Исследование физики взрыва, детонационных режимов взрывчатого превращения и многих других вопросов, связанных с откликом взрывчатого вещества (ВВ) на ударно-волновые воздействия, представляют большой интерес. При этом процессы, происходящие в ВВ при формировании детонационного режима, занимают особое место.

Для измерения параметров распространяющихся в ВВ импульсов сжатия и ударных волн при их трансформации в детонацию чаще всего используются электроконтактная, манганиновая [1] и электромагнитная [2] методики. Это так называемые контактные методики — датчики располагаются между слоями ВВ. В настоящее время широко применяются также бесконтактные методики. К ним относятся методы, в которых используются разного вида излучения: радиоволны миллиметрового диапазона [3], протонные пучки [4–6], рентгеновское излучение [7, 8], синхротронное излучение [9]. Используются также оптические и лазерные методики измерения [10, 11].

Экспериментальные исследования детонации в большом объеме проводятся в Институ-

те экспериментальной газодинамики и физики взрыва РФЯЦ-ВНИИЭФ. Накоплено много экспериментальных результатов по исследованию инициирования и развития детонации в гетерогенных ВВ методом импульсной рентгенографии [12]. Получаемые в виде изображений результаты дают возможность напрямую проводить сравнение с результатами численного моделирования [13].

Протонная радиография имеет ряд преимуществ перед традиционной рентгенографией. Протоны являются заряженными частицами, следовательно, ими можно управлять с помощью магнитного поля (магнитной оптики) и вести многокадровую и многолучевую съемку на базе единственного источника протонов. Это особенно актуально при исследовании переходных процессов взрывчатого превращения. Большая просвечивающая способность высокоэнергетичных протонов позволяет проводить эксперименты с образцами ВВ большого размера, что снижает влияние эффектов боковой разгрузки.

В источниках протонов отсутствует мишень, что исключает размытие изображения из-за геометрической нерезкости. Протонная радиография предполагает наличие мощного источника высокоэнергетичных прото-

нов, необходимого для получения высокой четкости изображения. Наличие в ГНЦ ИФВЭ (г. Протвино) ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ (У-70) позволяет использовать его для исследования методом протонной радиографии быстропротекающих процессов [14].

Регистрация протоннографических изображений проводится с помощью модульной многокадровой электронно-оптической системы регистрации на основе ПЗС-матриц, которая позволяет в настоящее время получать до 29 независимых кадров с размером поля изображения ≈ 60 мм, временным интервалом радиографирования до ≈ 5 мкс (минимальное время между кадрами 165 нс, время экспозиции $10 \div 30$ нс) и с оптическим разрешением 0.25 мм.

Цель данной работы — продемонстрировать возможности метода импульсного радиографирования на примере исследования инициирования детонации в пластифицированном ТАТБ.

ПОСТАНОВКА РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ОПЫТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ

Особенность радиографических исследований детонационных процессов заключается в том, что в процессе взрывчатого превращения в исследуемом заряде образуются различные области: ВВ в исходном состоянии; ВВ, сжатое ударными волнами; продукты взрыва; продукты частичного разложения за фронтом ударной волны. Все эти области разделены контактными границами, фронтами детонационных и ударных волн. Они имеют одинаковый элементный состав и отличаются только плотностью, причем не очень сильно. Так, плотность ВВ в исходном состоянии составляет ≈ 1.9 г/см³, плотность ВВ, сжатого ударными волнами, около 2.3 г/см³, плотность продуктов взрыва не превышает ≈ 2.5 г/см³.

Для исследования таких процессов предложена конструкция протяженной экспериментальной сборки, позволившая в традиционной для импульсной радиографии (рентгенографии и протоннографии) постановке опыта отчетливо увидеть размеры, форму и состояние вещества в различных областях заряда ВВ в процессе развития взрыва [12]. Схематично эта экспериментальная сборка показана на рис. 1. Особенность ее состоит в том, что инициирование

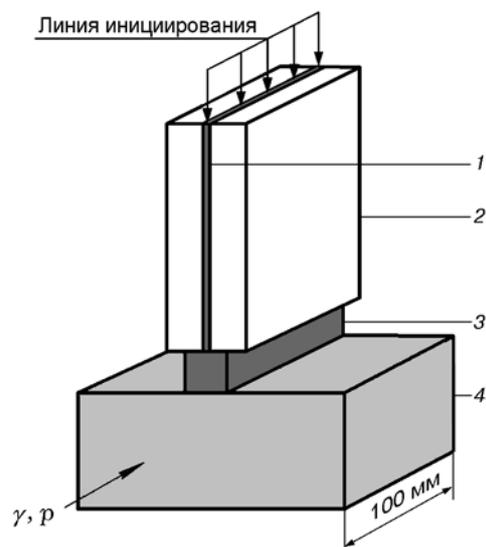


Рис. 1. Схема экспериментальной сборки:

1 — пластина из пластика ВВ, 2 — корпус из пенопласта, 3 — инициатор, 4 — образец ВВ

детонации осуществляется по линии, совпадающей с направлением просвечивающего пучка. При такой конструкции экспериментальной сборки и способе нагружения фронты ударных и детонационных волн имеют форму цилиндрической поверхности и в плоскости регистрации проецируются в линию, что позволяет получать изображения с достаточно высокой контрастностью.

Детонация к накладному заряду-инициатору подводится по линии с помощью пластины пластика ВВ, расположенной между двумя пластинами из пенопласта. Иницирование пластика ВВ осуществляется линейным генератором детонационной волны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Методом протонной радиографии проведена серия опытов по исследованию развития детонации ТАТБ. В опыте № 1 заряд ТАТБ одновременно нагружался двумя инициаторами из октогена разной ширины — 8×10 мм и 6×10 мм. Начальная плотность образца ТАТБ составляла 1.91 г/см³. Детонация в инициаторах возбуждалась по осевой линии с помощью пластин из пластика ВВ шириной 2 мм. Для определения времени выхода волны на поверхность образца под инициатором шириной 6 мм устанавливались контактные датчики (К1, К2). Момент выхода ударной волны

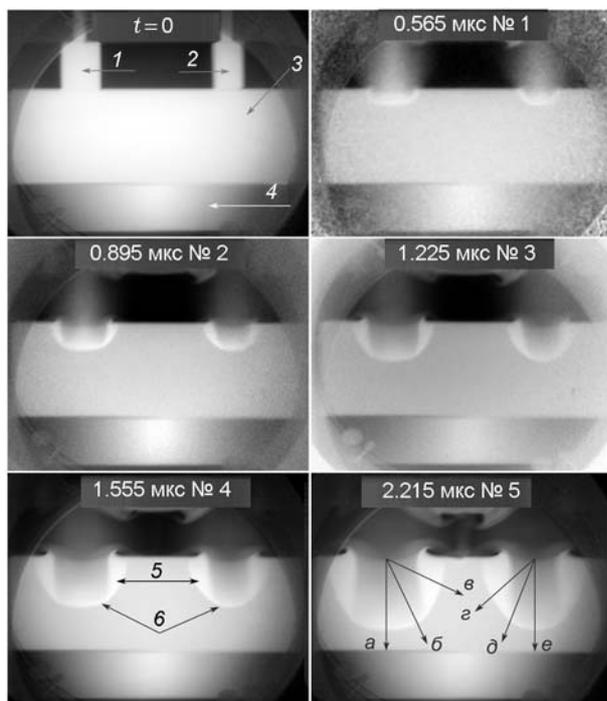


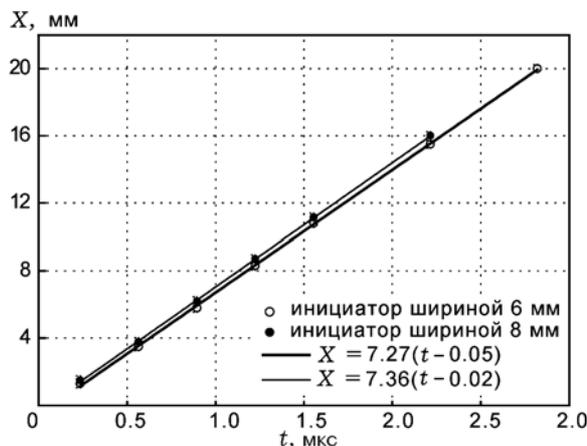
Рис. 2. Протонограммы опыта № 1:

1 — инициатор сечением 8×10 мм, 2 — инициатор сечением 6×10 мм, 3 — заряд ТАТБ, 4 — «оптический» клин, 5 — «темные» зоны, 6 — фронт детонационной волны, $a-e$ — направления, по которым определялась плотность

на поверхность образца принят за начало процесса. Под зарядом размещалась шашка ТАТБ переменной оптической толщины — «оптический» клин, который необходим для определения плотности вещества.

В эксперименте зарегистрированы протонографические изображения сборки до подрыва и пяти 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 начала нагружения образца, приведены на рис. 2.

Из полученных снимков видно, что на начальных стадиях иницирования «темные» зоны небольшие. По мере развития процесса из-за разгрузки с поверхности давление на фронте ударной волны снижается и, по-видимому, становится недостаточным для иницирования. Детонация развивается только непосредствен-

Рис. 3. $X-t$ -диаграмма распространения фронта детонационной волны

но под инициаторами и не идет в стороны. Это приводит к образованию «темных» зон, площадь которых растет со временем. При использовании инициаторов разной ширины «темные» зоны отличаются формой и размером. Качество регистрации изображений не уступает качеству регистрации рентгенографическим методом. Из-за малой длительности импульса (банча) протонов и отсутствия геометрической нерезкости, обусловленной неточностью источника, размытие фронта меньше, чем в традиционной рентгенографии.

На рис. 3 приведена $X-t$ -диаграмма распространения фронта волны. Время отсчитывается от начала нагружения образца ТАТБ. Через экспериментальные точки, соответствующие детонационной волне, построена прямая методом наименьших квадратов. Значение скорости составляет 7.36 ± 0.04 км/с для инициатора шириной 8 мм и 7.27 ± 0.05 км/с для инициатора шириной 6 мм.

Полученные изображения использовались для определения распределения плотности за фронтом. Плотность вещества определяли по поглощению излучения в объекте и сравнению его с поглощением в «оптическом» клине. На точность определения сильное влияние оказывает исходная неравномерность распределения протонов по полю регистрации. Полностью избавиться от этого фактора пока не удалось. В центральной части (диаметром ≈ 30 мм) изображений, где определялись профили плотности, остаточная неравномерность незначительна. Плотность вещества за фронтом вол-

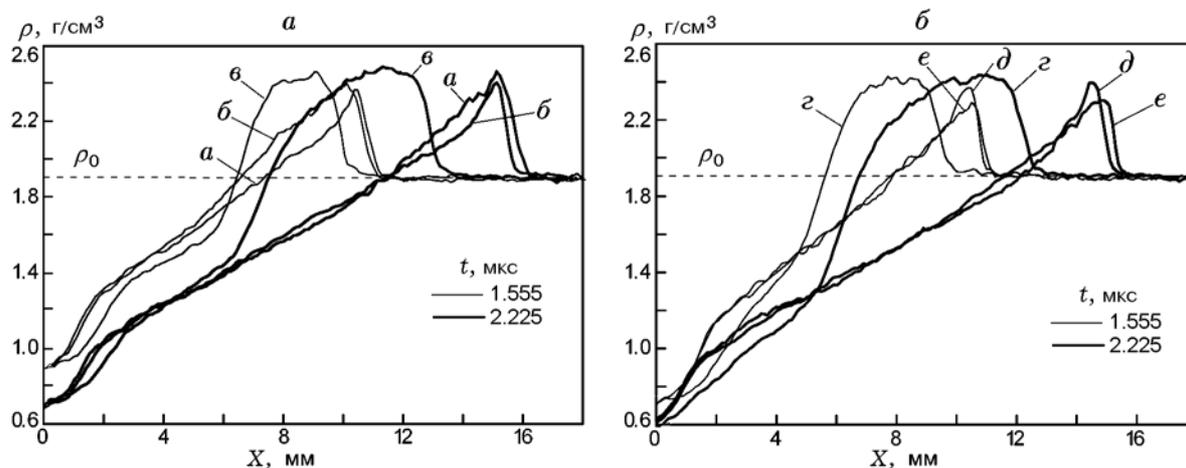


Рис. 4. Профили плотности, определенные по отдельным направлениям, для инициаторов шириной 8 (а) и 6 мм (б):

направления a ($\alpha = 90^\circ$), $б$ ($\alpha = 65^\circ$), $д$ ($\alpha = 90^\circ$), e ($\alpha = 115^\circ$) — распределения плотности вещества за фронтом детонационной волны, z ($\alpha = 135^\circ$) — распределения плотности вещества за фронтом ударной волны

ны вычисляли 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 в стационарном процессе (детонация с поверхности) носит систематический характер. Эту погрешность можно учесть расчетным способом или свести к минимуму, используя заряд большой протяженности вдоль направления радиографирования. По оценкам авторов статьи погрешность определения плотности вещества при размере заряда 100 мм в направлении просвечивания не превышает $\approx 5\%$.

На рис. 4 представлены профили плотности $\rho(x)$, определенные по отдельным направлениям при использовании разных инициаторов. Каждое направление характеризуется углом α , который отсчитывается от нагружаемой поверхности по направлению часовой стрелки. Координата $X = 0$ соответствует нагружаемой поверхности образца.

Из рис. 4 видно, что распределение плотности вещества за фронтом имеет характерный профиль для детонационной волны. Плотность вещества на фронте достигает значения $\approx 2.4 \text{ г/см}^3$ в различные моменты времени при разной ширине инициаторов. Спад плотности за фронтом детонационной волны по направлениям, отличным от 90° , происходит быстрее, чем при $\alpha = 90^\circ$. Это, по-видимому, обуслов-

лено расходимостью фронта и влиянием продуктов взрыва инициаторов на разлет продуктов взрыва ТАТБ. Плотность вещества внутри «темной» зоны, т. е. за фронтом ударной волны, составляет $\approx 2.4 \text{ г/см}^3$. Это значение близко к плотности вещества за фронтом детонационной волны.

В работе [15] приведены результаты исследования зависимости критического давления инициирования от плотности пластифицированного ТАТБ. Показано, что в диапазоне плотностей $1.89 \div 1.91 \text{ г/см}^3$ критическое давление инициирования быстро увеличивается, т. е. резко уменьшается ударно-волновая чувствительность ТАТБ. В аналогичной постановке на протонном ускорителе исследовалось влияние начальной плотности на инициирование детонации ТАТБ. В опыте № 2 начальная плотность образца ТАТБ составляла 1.85 г/см^3 , в опыте № 3 — 1.91 г/см^3 . В опыте № 2 инициатор на основе октогена имел сечение (ширина \times высота) $8 \times 10 \text{ мм}$, в опыте № 3 — $10 \times 8 \text{ мм}$.

На рис. 5 и 6 представлены характерные фазы взрывного процесса. При большей начальной плотности заряда размер «темных» зон больше, что неоднократно регистрировалось в рентгенографических экспериментах. В опыте № 2 в момент времени $t = 2.655 \text{ мкс}$ детонация начинает огибать непрореагировавшее вещество внутри «темной» зоны. В опыте № 6 с большей начальной плотностью за-

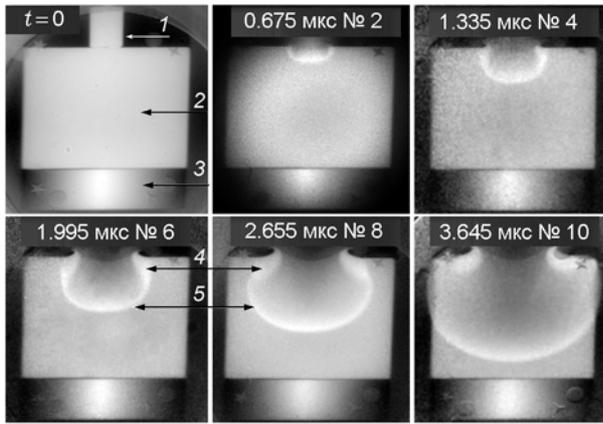


Рис. 5. Протонограммы опыта № 2:

1 — инициатор, 2 — заряд ТАТБ, 3 — «оптический» клин, 4 — «темные» зоны, 5 — фронт детонационной волны

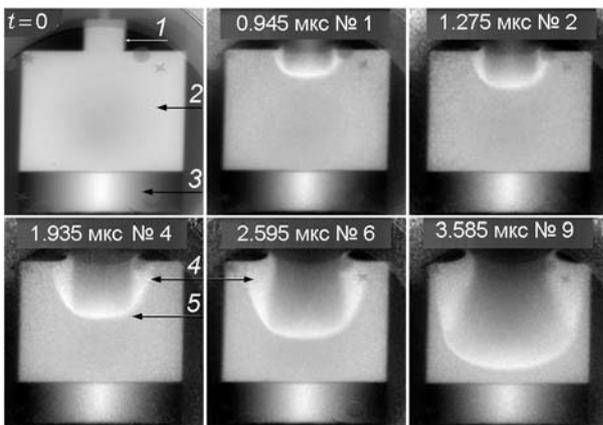


Рис. 6. Протонограммы опыта № 3:

1 — инициатор, 2 — заряд ТАТБ, 3 — «оптический» клин, 4 — «темные» зоны, 5 — фронт детонационной волны

ряда этот процесс начинается позже — $t = 3.915$ мкс.

Из-за разных размеров инициаторов в опытах № 2 и 3 невозможно провести прямое сравнение эволюции характерных областей при развитии детонации в зарядах разной начальной плотности. Экспериментальные данные опыта № 2 можно сравнить с данными опыта № 1, где использовался инициатор сечением 8×10 мм. На рис. 7 показана эволюция характерных областей при иницировании зарядов ТАТБ различной начальной плотности. На графике хорошо видна разница в размере и форме «темных» зон при распространении де-

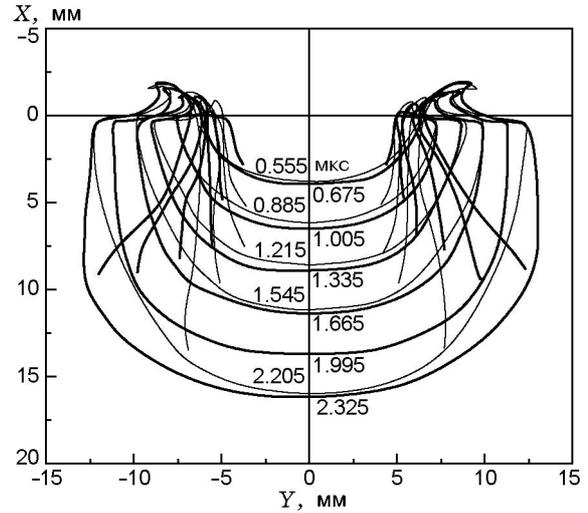


Рис. 7. Эволюция характерных областей при развитии детонации в зарядах разной начальной плотности:

инициатор 8×10 мм; толстые линии — $\rho_0 = 1.85$ г/см³, тонкие — $\rho_0 = 1.91$ г/см³

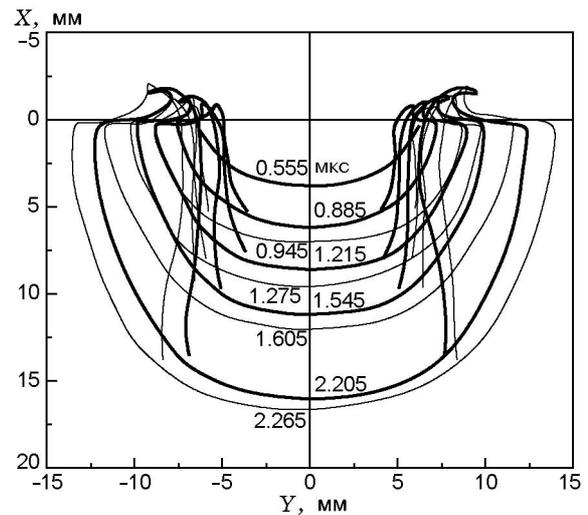


Рис. 8. Эволюция характерных областей детонации при использовании инициаторов разной ширины:

толстые линии — 8 мм, тонкие — 10 мм; $\rho_0 = 1.91$ г/см³

тонации (толстые и тонкие линии).

На рис. 8 представлена эволюция характерных областей при иницировании зарядов ТАТБ одной плотности, но разными инициаторами (ширина \times высота — 8×10 и 10×8 мм). Из представленных зависимостей видно, что небольшое изменение ширины инициатора не влияет на форму и размер «темных» зон.

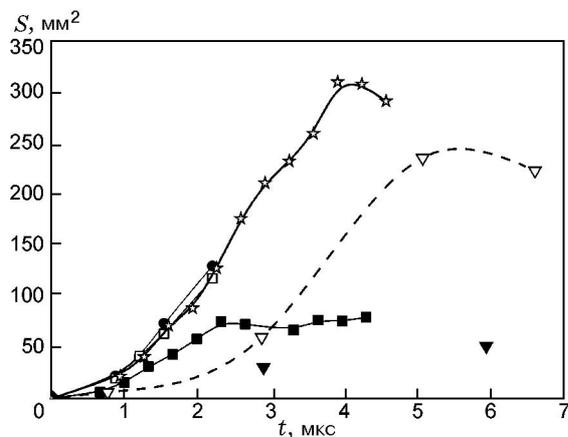


Рис. 9. Зависимость площади «темной» зоны от времени:

ТАТБ: ● — опыт № 1, 6×10 мм, $\rho_0 = 1.91$ г/см³; □ — опыт № 1, 8×10 мм, $\rho_0 = 1.91$ г/см³; ■ — опыт № 2, 8×10 мм, $\rho_0 = 1.85$ г/см³; ☆ — опыт № 3, 10×8 мм, $\rho_0 = 1.91$ г/см³; LX-17: ▽ — $\rho_0 = 1.91$ г/см³, ▼ — $\rho_0 = 1.87$ г/см³

По данным рис. 7, 8 построена зависимость площади «темной» зоны от времени (рис. 9). Для зарядов пониженной плотности площадь сначала растет, а затем, как только детонация огибает «темную» зону, практически не изменяется. При плотности заряда ТАТБ 1.91 г/см³ площадь «темной» зоны растет быстрее, чем при плотности 1.85 г/см³. Рост зависимости прекращается при выходе ударной и детонационной волн на свободную поверхность заряда. Аналогичные зависимости для LX-17 получены в работе [8].

При большей начальной плотности заряда ТАТБ, но несколько различающихся размерах инициатора зависимости площади зоны не прореагировавшего вещества от времени практически одинаковы (см. рис. 9). Это, по-видимому, связано с тем, что если мощность инициатора такова, что непосредственно под ним возникает детонация (как в нашем случае), то эволюция площади «темной» зоны не зависит от ширины инициатора. Этот вывод в общем виде справедлив только для плоского инициирования, а при линейном инициировании изменение ширины в широком диапазоне должно влиять на форму и размер «темной» зоны.

По полученным изображениям построена $X-t$ -диаграмма распространения фронта детонационной волны и определена его скорость. При начальной плотности ТАТБ 1.85 г/см³ скорость фронта составляет 7.31 ± 0.06 км/с,

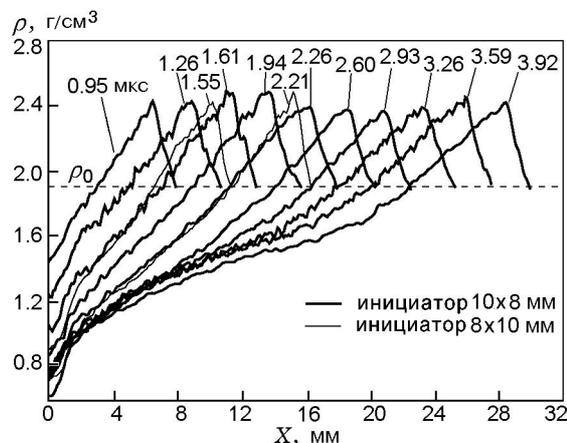


Рис. 10. Профиль плотности в опыте № 3

при 1.91 г/см³ — 7.38 ± 0.03 км/с.

На рис. 10 представлены профили плотности $\rho(X)$, определенные по линии, перпендикулярной нагружаемой поверхности исследуемого образца, в опыте № 3. Координата $X = 0$ соответствует нагружаемой поверхности образца. Из рисунка видно, что распределение плотности вещества за фронтом детонационной волны имеет характерный вид. Плотность вещества на фронте достигает ≈ 2.4 г/см³ и затем плавно падает. Вид профилей плотности одинаков, и они хорошо согласуются между собой. На рис. 10 приведены также распределения плотности, полученные в опыте № 1, но с инициатором сечением 8×10 мм. Результаты прекрасно согласуются друг с другом.

Данные по форме, положению фронтов и «темных» зон, $X-t$ -диаграммы распространения фронта волны, полученные на протонном ускорителе, пригодны для калибровки численных методик расчета инициирования детонации в зарядах ТАТБ различной начальной плотности при ударно-волновом нагружении. Данные о плотности вещества за фронтом детонационной волны хорошо согласуются, как между собой, так и с результатами экспериментов, проведенных в разное время, в том числе и с помощью рентгенографической методики. Плотность вещества определяется по поглощению излучения в объекте и сравнению с поглощением в «оптическом» клине, поэтому повышение точности ее определения требует более совершенной корректировки неравномерности исходного протонного пучка по полю изображения с целью использования этих данных для калибровки численных методик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На ускорительном комплексе протонов У-70 ИФВЭ проведены исследования инициирования и развития детонации в пластифицированном ТАТБ. Использование многокадровой протонной радиографии позволило в одном опыте подробно исследовать особенности этих процессов. Качество полученных изображений сравнимо с качеством изображений при использовании рентгенографической методики.

В опыте № 1 исследовалось влияние ширины инициатора на возбуждение детонации. Получены профили плотности $\rho(X)$, определенные по отдельным направлениям для разных инициаторов в различные моменты времени. По изображениям взрывного процесса построены $X-t$ -диаграммы распространения фронта детонационной волны от инициаторов разной ширины. Скорость фронта составляет 7.36 ± 0.04 км/с при использовании инициатора шириной 8 мм и 7.27 ± 0.05 км/с при инициаторе шириной 6 мм.

В опытах № 2 и 3 исследовалось влияние начальной плотности образцов на иницирование детонации. По изображениям взрывного процесса получена эволюция формы области непрореагировавшего вещества для зарядов начальной плотностью 1.85 и 1.91 г/см³. Построены зависимости площади «темной» зоны от времени при развитии детонации, которые на качественном уровне совпадают с результатами других исследователей.

Данные по форме зон непрореагировавшего вещества, по положению фронтов ударной и детонационной волн, полученные на протонном ускорителе У-70, используются для калибровки численных методов расчета инициирования детонации ВВ на основе ТАТБ при ударно-волновом нагружении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Канель Г. И. Применение манганиновых датчиков для измерения давления ударного сжатия конденсированных сред. — М., 1974. — Деп. в ВИНТИ, № 477-74.
2. Зайцев В. М., Похил П. Ф., Шведов К. К. Электромагнитный метод измерения скорости продуктов взрыва // Докл. АН СССР. — 1960. — Т. 132, № 6. — С. 1339–1340.
3. 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 // XI Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. — С. 69–73.
4. 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.
5. 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., Фортгов 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.
6. Антипов Ю. М., Афонин А. Г., Василевский А. В. и др. Протонная радиографическая установка на 70 ГэВ ускорителе ГИЦ ИФВЭ // ПТЭ. — 2010. — № 6. — С. 5–12.
7. Дорохин В. В., Зубарев В. Н., Орехин Ю. К., Панов Н. В., Шаболдина Н. Л. Непрерывная регистрация рентгенографическим методом движения продуктов взрыва за фронтом ДВ // Физика горения и взрыва. — 1988. — Т. 24, № 1. — С. 118–122.
8. 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 // 13th Symp. (Intern.) on Detonation. — Maryland, California, 2006. — P. 1040.
9. Зубков П. И., Кулипанов Г. Н., Лукьянчиков Л. А., Ляхов Н. З., Тэн К. А., Титов В. М., Толочко Б. П., Федотов М. Г., Шарафутдинов М. Р., Шеромов М. А. Измерение плотности вещества за фронтом ударных и детонационных волн с помощью синхротронного излучения // III Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. — С. 306–311.
10. Thomer G. Физика быстропротекающих процессов / под ред. Н. А. Златина. — М.: Мир, 1971. — Т. 1. — С. 200–335.
11. Уткин А. В., Канель Г. И. Детонация и ударные волны. — Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1986. — С. 13–16.
12. Комрачков В. А., Ковтун А. Д., Макаров Ю. М. Применение импульсной рентгенографии для исследования ударно-волнового иницирования ТАТБ // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 2. — С. 96–101.
13. Бахрах С. М., Карпенко И. И., Комрачков В. А., Морозов В. Г. и др. Экспериментальное и численное исследование развития процесса детонации ВВ типа ТАТБ // VII Харитоновские тематические научные чтения: тр.

- международ. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. — С. 109–116.
14. **Антипов Ю. М., Афонин А. Г., Василевский А. В. и др.** Протонная радиографическая установка на 70 ГэВ ускорителе ГНЦ ИФВЭ. — Протвино, 2009. — (Препр./ИФВЭ № 2009-14).
15. **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.

Поступила в редакцию 12/IX 2011 г.
