

УДК 662.215.5

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ПОЛУКОЛЬЦЕВЫХ ЗАРЯДАХ ИЗ ТАТБ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ

А. В. Ерастов, К. Н. Панов

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

Рентгенографическим методом исследован процесс распространения детонации в полукольцевых зарядах из пластифицированного ТАТБ со стальной оболочкой внутри при инициировании нормальной детонации по линии на наружной поверхности заряда. Определена форма фронта детонационной волны в различные моменты времени. Зафиксировано влияние на форму фронта слоя пластического взрывчатого вещества на основе гексогена, расположенного на поверхности основного заряда и имеющего скорость детонации на $\approx 10\%$ выше, чем у ТАТБ. Показано, что положение и форма фронта детонационной волны в заряде ТАТБ цилиндрической формы не описываются законами геометрической оптики (принцип Гюйгенса) из-за особенностей инициирования детонации на начальном участке и наличия стальной оболочки.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, ударная волна, детонация, рентгенография, инициирование, принцип Гюйгенса.

DOI 10.15372/FGV20190513

ВВЕДЕНИЕ

Распространение детонации в малочувствительном взрывчатом веществе (ВВ) на основе ТАТБ представляет исключительный интерес. Известно, что ТАТБ характеризуется сильной зависимостью ударно-волновой чувствительности от начальной плотности [1]. Поэтому по сравнению с другими ВВ (октоген, гексоген) он обладает рядом ярко выраженных свойств [2]. ТАТБ, сжатый слабой ударной волной, десенсибилизируется, т. е. становится менее чувствительным, — детонационная волна (ДВ) не распространяется в ударно-сжатую область заряда [3]. Если при ударно-волновом нагружении происходит снижение плотности, например, в волнах разгрузки, то ТАТБ сенсibiliзируется, т. е. повышается ударно-волновая чувствительность [4–6].

Известно, что для многих ВВ скорость детонации зависит от кривизны фронта волны. Существование критического и предельного диаметра для каждого ВВ является практическим подтверждением такой зависимости. Для составов на основе октогена и ТАТБ значения предельного диаметра сильно отличаются. Следовательно, существенно и отличие в зависимостях скорости детонации от кривиз-

ны фронта: для составов на основе октогена зависимость слабая, для составов на основе ТАТБ — сильная. Это означает, что при описании распространения фронта ДВ в зарядах сложной формы на основе октогена и гексогена в первом приближении можно пользоваться законами геометрической оптики: в зоне прямой видимости точки инициирования — окружность, в области «тени» — эвольвента. Для ВВ на основе ТАТБ законы геометрической оптики не работают и описать процесс можно только численно с привлечением кинетики развития взрывчатого превращения [7–10]. В большинстве указанных работ эксперименты проводились в цилиндрической геометрии для более надежной регистрации формы фронта радиографическим методом.

Цель настоящей работы — исследование процесса инициирования и распространения детонации в цилиндрическом заряде из пластифицированного ТАТБ и определение влияния наружного слоя пластического ВВ на основе гексогена с большей, чем у ТАТБ, скоростью детонации на форму фронта ДВ.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опыты проводились на импульсной рентгеновской установке «Эридан-3» с мягким

спектром излучения с граничной энергией $E_\gamma \approx 1$ МэВ, длительностью $\Delta t \approx 0.05$ мкс и размером фокуса 2 мм [11]. Изображения регистрировались на пакет из десяти фотохромных экранов из галогенида бария, активированного европием, расположенных друг за другом. Итоговое рентгеновское изображение получалось путем суммирования 10 изображений по специально разработанному алгоритму [12]. Технические характеристики фотохромных экранов — динамический диапазон регистрации, 10^4 и более; линейная переходная характеристика в большом диапазоне поглощенных доз; одноквантовая γ -чувствительность активного вещества люминофора; пространственное разрешение ≈ 9 линий/мм или 223 dpi.

На рис. 1 представлен эскиз экспериментальной сборки. Полуцилиндрический заряд пластифицированного ТАТБ размером $\varnothing 120 \times \varnothing 60$ мм подрывался инициатором, состоящим

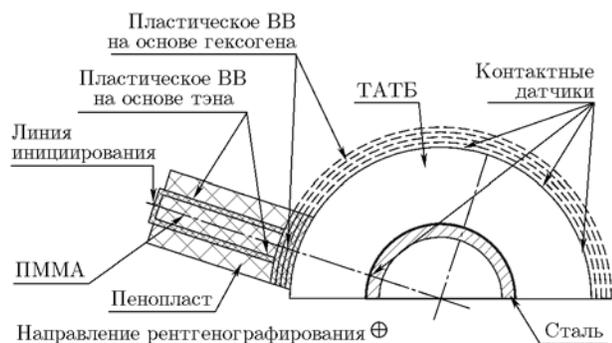


Рис. 1. Эскиз экспериментальной сборки

из листов пластического ВВ на основе тэна (толщина листа 2 мм, расстояние между пластинами 10 мм) и слоя пластического ВВ на основе гексогена толщиной 8 мм (четыре слоя по 2 мм). Пластины тэна инициировались линейным генератором детонационной волны. Детонация в заряде ТАТБ возникала при столкновении ДВ в слое по линии на наружной поверхности. Внутри заряда с зазором 0.5 мм устанавливалась стальная оболочка толщиной 5 мм. Все детали сборки в направлении рентгенографирования имели толщину 60 мм. Для контроля распространения детонации на наружной поверхности заряда и напротив инициатора устанавливались контактные датчики в виде скрутки двух лакированных проводов диаметром 0.1 мм. Координаты датчиков определялись по предварительному рентгеновскому снимку с точностью ≈ 0.2 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведено две серии экспериментов. В первой серии слой пластического ВВ на основе гексогена располагался непосредственно под инициатором (опыты 1–4), во второй — на всей наружной поверхности заряда ТАТБ (опыты 5–7) (см. рис. 1).

В опыте 1 исследовался процесс развития детонации от инициатора в заряде ТАТБ в форме параллелепипеда. В опытах 2–4 изучалось распространение детонации в цилиндрическом заряде со стальной оболочкой внутри.

Начальные данные и некоторые результаты опытов

| Номер опыта | ρ_0 , г/см ³ | T , °С | t_γ , мкс | t , мкс | Форма образца |
|-------------|------------------------------|----------|------------------|-----------|---|
| 1 | 1.893 | –8 | 26.60 | 1.99 | Параллелепипед из ТАТБ |
| 2 | 1.885 | –2 | 36.17 | 11.56 | Полуцилиндр из ТАТБ |
| 3 | 1.885 | 1 | 38.05 | 13.55 | Полуцилиндр из ТАТБ |
| 4 | 1.886 | –1 | 34.16 | 9.55 | Полуцилиндр из ТАТБ |
| 5 | 1.886 | –2 | 37.94 | 13.33 | Полуцилиндр из ТАТБ со слоем пластического ВВ |
| 6 | 1.887 | –1 | 34.00 | 9.39 | Полуцилиндр из ТАТБ со слоем пластического ВВ |
| 7 | 1.885 | –15 | 30.86 | 6.25 | Полуцилиндр из ТАТБ со слоем и без пластического ВВ |

Примечания. ρ_0 — начальная плотность заряда, T — температура окружающей среды, t_γ — время рентгенографирования (интервал между моментом подачи высоковольтного импульса в цепь электродетонатора и моментом γ -импульса), $t = t_\gamma - t_{ВВ}$ — интервал времени между моментом выхода ДВ на поверхность ТАТБ в точке столкновения и моментом рентгенографирования, $t_{ВВ}$ — время выхода ДВ на поверхность ТАТБ в точке столкновения, измеренное в опыте 1 (плоский случай) и равное 24.61 мкс.

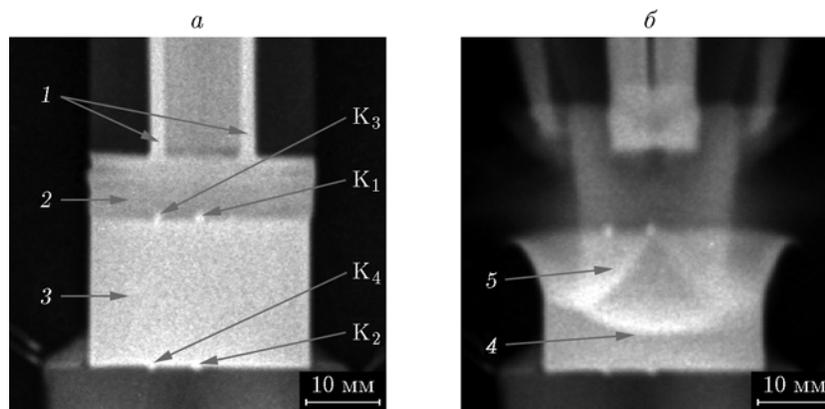


Рис. 2. Рентгеновские снимки опыта 1:

a — предварительный снимок, *б* — снимок взрывного процесса; 1 — листы пластического ВВ на основе тэна, 2 — слой пластического ВВ на основе гексогена, 3 — образец ТАТБ, 4 — фронт ДВ, 5 — зона непрореагировавшего ТАТБ, К₁–К₄ — контактные датчики

В опытах 5–7 исследовалось влияние слоя пластического ВВ на основе гексогена на форму детонационного фронта в цилиндрическом заряде.

Начальные данные экспериментальных сборок и некоторые результаты опытов представлены в таблице.

На рис. 2 приведены предварительный снимок и снимок взрывного процесса в опыте 1. Заряд ТАТБ представлял собой параллелепипед высотой 20 мм, шириной 30 мм и толщиной на просвет 60 мм. На поверхности заряда вдоль направления рентгенографирования устанавливались контактные датчики К₁–К₄ в виде отрезков скрученной проволоки, они видны на снимках в виде точек. Время работы инициатора определялось по данным датчика К₁, расположенного в месте столкновения ДВ в слое, и составило 24.61 мкс. Моменты срабатывания остальных датчиков следующие: К₂ — 27.38 мкс, К₃ — 24.36 мкс, К₄ — 27.51 мкс.

Из полученных рентгеновских снимков видно, что детонация в ТАТБ начинается в месте столкновения ДВ в слое. Непосредственно под листами из пластического ВВ на основе тэна в инициаторе детонация не возникает.

На рис. 3 приведен рентгеновский снимок взрывного процесса в опыте 7. Инициатор устанавливался посередине заряда ТАТБ. В одной половине слой пластического ВВ на основе гексогена присутствовал, в другой — нет. Рентгеновский снимок наглядно демонстрирует влияние слоя с большей скоростью детонации, чем в ТАТБ, на распространение детонации в цилиндрическом заряде.

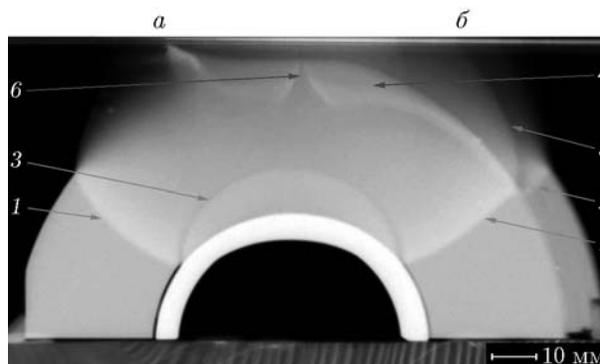


Рис. 3. Снимок взрывного процесса в опыте 7 ($t = 6.25$ мкс):

a — без слоя, *б* — со слоем; 1 — фронт ДВ в ТАТБ, 2 — фронт ДВ в пластическом ВВ на основе гексогена, 3 — фронт отраженной ударной волны в продуктах взрыва ТАТБ, 4 — зона непрореагировавшего ТАТБ, 5 — фронт отраженной ударной волны в продуктах взрыва слоя пластического ВВ на основе гексогена, 6 — линия инициирования детонации в ТАТБ — место столкновения ДВ в слое пластического ВВ на основе гексогена

На рис. 4 представлены рентгеновские снимки взрывного процесса в опытах 4 и 6. На них хорошо видна структура течения в продуктах взрыва за фронтом ДВ: отраженная от стальной оболочки ударная волна; голова волны разрежения от выхода ударной волны на внутреннюю границу оболочки. Эти данные могут быть использованы для калибровки уравнения состояния продуктов взрыва ТАТБ. На рентгеновских снимках зафиксировано влияние слоя пластического ВВ на основе гексогена, расположенного на поверхности заряда

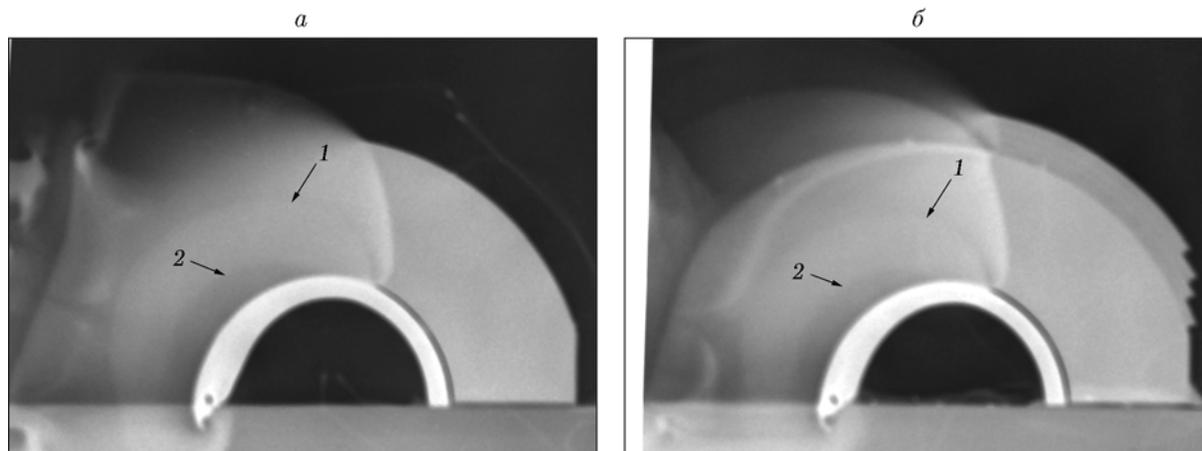


Рис. 4. Влияние слоя:

a — опыт 4, без слоя, $t = 9.55$ мкс, *б* — опыт 6, со слоем, $t = 9.39$ мкс; 1 — фронт отраженной ударной волны, 2 — голова волны разрежения

ТАТБ, на распространение детонации. Так как скорость фронта ДВ в слое пластического ВВ выше, чем в ТАТБ, то на начальном участке распространения процесс «ведется» фронтом детонации слоя. Вследствие этого фронт ДВ в ТАТБ имеет форму, отличную от случая, когда слоя нет. В месте, где фронт детонации в заряде ТАТБ догоняет фронт детонации в слое (из-за разницы длин путей), это влияние прекращается, и далее детонация в слое инициируется из заряда ТАТБ. Видно, что детонация в слое в скользящем режиме не инициирует ТАТБ, т. е. в заряде существует область ударно-сжатого непрореагировавшего ТАТБ, в которую детонация не распространяется и которая уменьшается до нуля по мере распространения процесса.

ОБСУЖДЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 5 приведены положения фронтов ДВ в разные моменты времени. Для удобства анализа и построения графиков точка инициирования расположена, в отличие от приведенных рентгеновских снимков, сверху и имеет координаты $X = 0$, $Y = 60$ мм. Погрешность определения фронта ДВ по рентгеновскому снимку составляет ± 0.4 мм (2σ). Рис. 5 наглядно иллюстрирует влияние слоя пластического ВВ на основе гексогена на форму фронта ДВ в ТАТБ. Влияние сильнее проявляется на начальном участке процесса и прекращается в месте, где фронт ДВ в ТАТБ догоняет фронт ДВ в слое. Штрихпунктирной линией выделе-

на граница области прямой видимости точки инициирования.

На рис. 6 приведена $X-t$ -диаграмма движения фронта ДВ в заряде ТАТБ по центру инициатора в разных опытах. Экспериментальные точки хорошо описываются линейной зависимостью, построенной методом наименьших квадратов (МНК). Скорость фронта ДВ составляет ≈ 7.37 км/с, что соответствует скорости расходящейся детонации в ТАТБ.

На рис. 7 приведена $X-t$ -диаграмма движения ДВ в слое по данным контактных датчиков и положению фронта на рентгеновских снимках в области опережения фронта ДВ в ТАТБ. Скорость фронта ДВ в слое составляет ≈ 8.2 км/с, что соответствует скорости нормальной детонации данного пластического ВВ.

На рис. 8 приведена суммарная $X-t$ -диаграмма движения ДВ в зоне прямой видимости точки инициирования по данным всех опытов без слоя. Если формально построить с помощью метода наименьших квадратов линейную зависимость, то получим скорость фронта ДВ, приблизительно равную 7.9 км/с. Если разбить экспериментальные данные на две группы — по оси инициатора и вне ее, то в первом случае скорость фронта составит ≈ 7.37 км/с (см. рис. 6), а во втором — ≈ 7.32 км/с. Это может свидетельствовать об изменении скорости детонации по мере ее распространения по заряду ТАТБ.

На рис. 5 приведены рассчитанные по Гюйгенсу положения фронтов ДВ при скорости ДВ 7.4 км/с в характерные моменты вре-

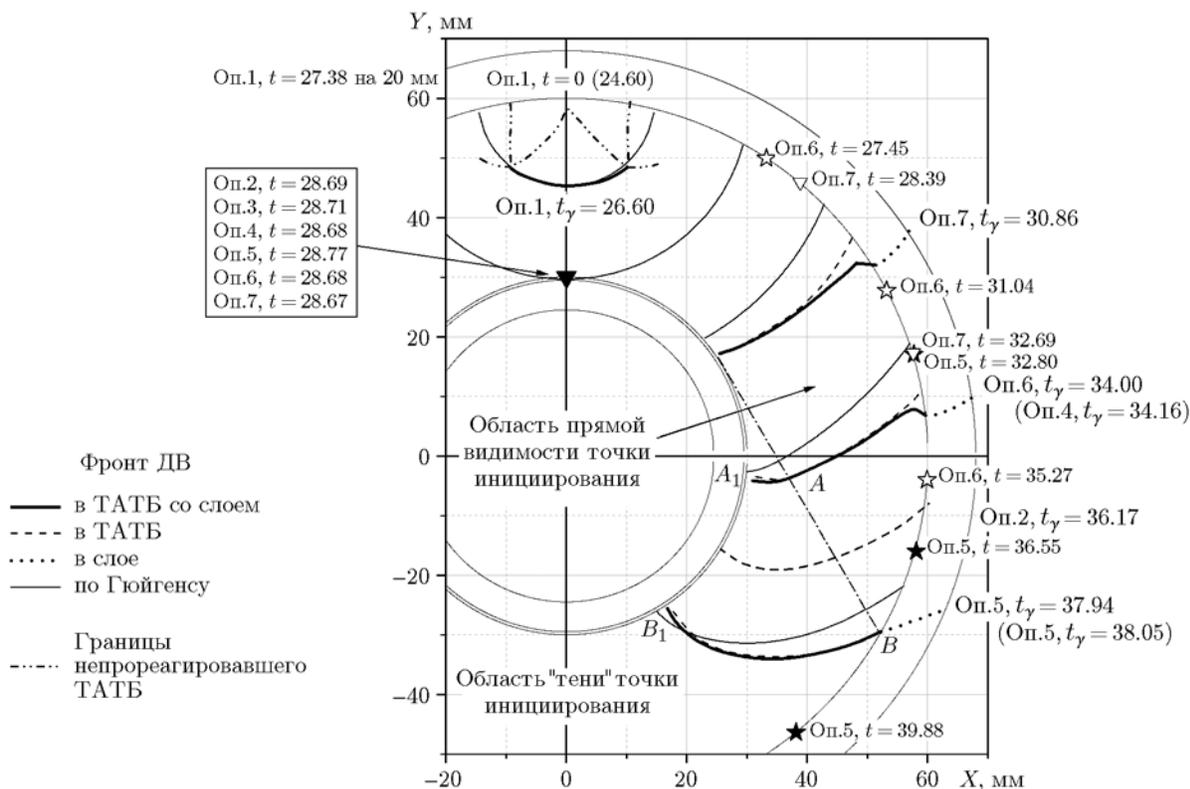


Рис. 5. Форма фронта ДВ (сплошные линии):
 Оп.1–Оп.7 — номера опытов; t — момент срабатывания датчика, мкс, t_γ — момент рентгенографирования, мкс

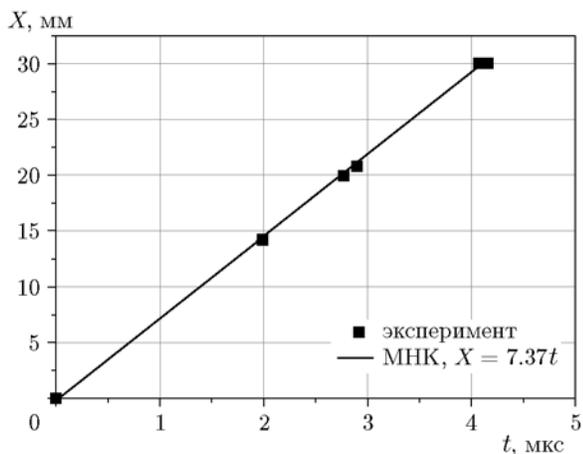


Рис. 6. $X-t$ -диаграмма движения ДВ в заряде ТАТБ по центру инициатора

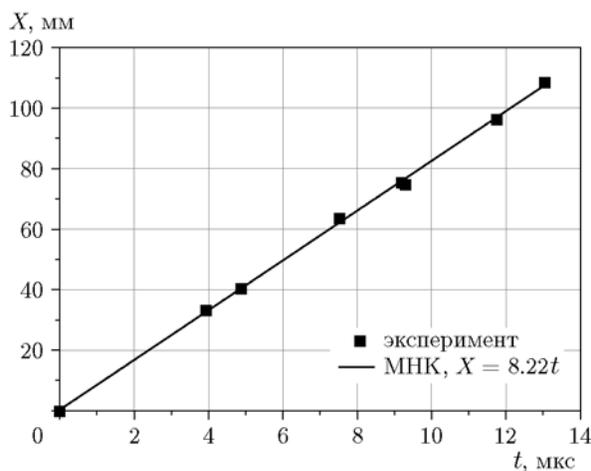


Рис. 7. $X-t$ -диаграмма движения ДВ в слое

мени — моменты рентгенографирования и выхода ДВ на противоположную инициированию поверхность заряда. В зоне прямой видимости точки инициирования фронт представляет собой окружность, в зоне «тени» — эвольвен-

ту. Видно, что в случае расположения слоя под инициатором результаты расчета и эксперимента хорошо согласуются. С внешней стороны заряда детонация приходит значительно раньше в эксперименте, чем получено в расчете (фронт должен находиться за первым контакт-

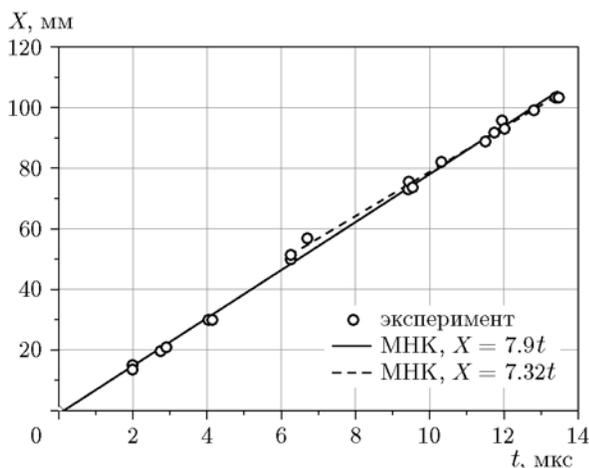


Рис. 8. $X-t$ -диаграмма движения ДВ в зоне прямой видимости

ным датчиком из опыта 7). На начальном этапе инициирования детонации при столкновении ДВ в инициаторе фронт ДВ в ТАТБ движется внутри области ударно-сжатого материала, границы которой перемещаются со скоростью фронта ударной волны — ≈ 5 км/с. При этом в точке касания фронтом ДВ области ударно-сжатого материала детонация распространяется с большей скоростью, чем вдоль плоскости симметрии. Это приводит к более пологому фронту ДВ на начальном этапе, чем в предположении геометрической оптики. В дальнейшем детонация огибает зону ударно-сжатого вещества, при этом форма фронта ДВ претерпевает еще большие отличия от цилиндрической формы.

Как показывает рис. 5, экспериментальное положение фронта ДВ отличается от расчетного не только вблизи наружной поверхности заряда, но и в области взаимодействия ДВ со стальной оболочкой. В промежутке времени $26.6 \div 30.86$ мкс скорость детонации увеличивается, что, по-видимому, связано с пересжатым режимом ее распространения в этой области. При этом видно, что за точкой касания прямой, проходящей из точки инициирования к поверхности оболочки, скорость фронта практически не меняется — расчетное положение фронта находится на одинаковом расстоянии от экспериментального.

В области «тени» точки инициирования фронт ДВ движется с замедлением. Расчет расстояния, которое прошла детонация между двумя моментами рентгенографирования (опыт 6 ≈ 34 мкс и опыты 5 ≈ 38 мкс), дает раз-

ные значения в зоне «тени» A_1B_1 и в зоне прямой видимости (по касательной) AB — 25.9 и 29.9 мм соответственно. При этом средняя скорость детонации на этом участке составляет 6.5 и 7.5 км/с. Расчетное положение фронта ДВ в зоне прямой видимости отстает от эксперимента, в зоне «тени» опережает эксперимент в точке касания оболочки. Это свидетельствует об уменьшении скорости детонации при обтекании фронтом ДВ оболочки в области «тени» точки инициирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рентгенографическим методом определена форма фронта ДВ в процессе распространения детонации в полуцилиндрическом заряде из пластифицированного ТАТБ $\varnothing 120 \times \varnothing 60$ мм со стальной оболочкой толщиной 5 мм при инициировании нормальной детонации по линии на поверхности.

В опытах зафиксировано влияние слоя пластического ВВ на основе гексогена, расположенного на поверхности заряда ТАТБ, на распространение детонации.

Экспериментальное положение и форма фронта ДВ в заряде ТАТБ цилиндрической формы не описываются законами геометрической оптики (принцип Гюйгенса) из-за особенностей инициирования детонации на начальном участке и при взаимодействии со стальной оболочкой.

Показано, что при взаимодействии фронта ДВ со стальной оболочкой в зоне прямой видимости точки инициирования скорость детонации возрастает из-за пересжатого режима. При обтекании детонацией стальной оболочки в области «тени» точки инициирования скорость фронта уменьшается.

Полученные экспериментальные данные можно использовать для калибровки численных методик расчета распространения детонации в зарядах сложной формы из пластифицированного ТАТБ с учетом кинетики детонации.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. **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.
3. **Морозов В. Г., Карпенко И. И., Ковтун А. Д., Комрачков В. А. и др.** Расчетное моделирование с опорой на эксперименты инициирования и развития детонации ВВ на основе ТАТБ с учетом десенсибилизации при взаимодействии ударной и детонационной волн. — Саров, 1995. — С. 37–95. — (Препринт/РФЯЦ-ВНИИЭФ).
4. **Андреев С. Г., Бойко М. М., Соловьев В. С.** Иницирование ВВ при ступенчатом нагружении // Физика горения и взрыва. — 1976. — Т. 12, № 1. — С. 117–120.
5. **Комрачков В. А., Панов К. Н., Целиков И. С.** Изменение ударно-волновой чувствительности пластифицированных ТАТБ и октогена при разгрузке в зазор // VII Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. — С. 179–187.
6. **Плаксин И. Е., Герасимов В. М., Шутов В. И. и др.** Переходные процессы взрывчатого превращения в ВВ на основе ТАТБ: развитие и затухание взрыва при воздействии сталкивающихся волнами и ударными волнами плоской геометрии — однократными и двукратными с промежуточной разгрузкой // Симпоз. по энергетическим материалам, США, Ливермор, 1994.
7. **Tonghu Z., Qingzhong L., Feng Zh., Lishi H., Zhi H., Wen G.** An experimental study of detonation propagation in the arc insensitive high explosive initiated on the basal plane // Eleventh Int. Detonation Symp., Snowmass, Colorado, USA, 1998. — P. 1023–1028.
8. **Bdzil J. B., Fickett W., Stewart D. S.** Detonation shock dynamics: A new approach to modeling multidimensional detonation waves // Ninth Int. Detonation Symp., Portland, USA, 1989. — P. 730–742.
9. **Matignon Ch., Sorin R., Bozier O.** Detonation propagation of converging front in IHE: Comparison of direct numerical simulation and detonation shock dynamics against experimental data // Fourteenth Int. Detonation Symp., USA, 2010. — P. 1182–1190.
10. **Lubyatinsky S. N., Batalov S. V., Garmashev A. Yu., Israelyan V. G., Kostitsyn O. V., Loboiko B. G., Pashentsev V. A., Sibilev V. A., Smirnov E. B., Filin V. P.** Detonation propagation in 180° ribs of an insensitive high explosive // Shock Compression of Condensed Matter, Portland, Oregon, July 20–25, 2003.
11. **Невозможущие** методы диагностики быстротекающих процессов / под ред. А. Л. Михайлова. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015.
12. **Аринин В. А., Ткаченко Б. И.** Применение проективных преобразований при метрологической обработке изображений // Тр. РНТОРЭС им. А. С. Попова. Сер. Цифровая обработка сигналов и ее применение. — 2006. — Вып. VII-2. — С. 464.

Поступила в редакцию 04.05.2018.

После доработки 06.12.2018.

Принята к публикации 26.12.2018.