

УДК 662.215.5

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДАХ ИЗ ТАТБ

А. В. Ерастов, В. В. Змушко, Т. И. Змушко, К. Н. Панов

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

Исследован процесс распространения детонации в заряде из пластифицированного взрывчатого состава на основе ТАТБ в форме полого цилиндра со стальной оболочкой внутри при инициировании нормальной детонации по линии на наружной поверхности заряда. В экспериментах рентгенографическим методом определена форма фронта детонационной волны (ДВ) в некоторые моменты времени. С помощью электроконтактных датчиков измерена скорость распространения фронта ДВ по наружной поверхности заряда. Оригинальная постановка экспериментов позволила исследовать распространение детонации на углы более 180° от линии инициирования. Показано, что в плоскости инициирования скорость фронта расходящейся ДВ составляет ≈ 7.3 км/с. В области «тени» точки инициирования скорость фронта расходящейся ДВ уменьшается в зависимости от пройденного расстояния как по наружной поверхности заряда — до ≈ 6 км/с, так и по внутренней — до ≈ 5.6 км/с. При этом около стальной оболочки в области углов разворота фронта ДВ примерно от 150 до 210° зафиксирована зона непрореагировавшего ТАТБ, которая может свидетельствовать о срыве детонации и трансформации ее в ударную волну. Проведено численное моделирование процесса с использованием кинетики детонации SURF, реализованной в методике МИМОЗА. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными как на ранней стадии процесса инициирования детонации, так и в области «тени» точки инициирования, где скорость фронта ДВ уменьшается.

Ключевые слова: взрывчатый состав, ударная волна, детонация, рентгенография, инициирование, кинетика, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV2022.9286
EDN LZNULD

ВВЕДЕНИЕ

Иницирование и распространение детонации в малочувствительном взрывчатом веществе на основе ТАТБ представляет исключительный интерес. Известно, что ударно-волновая чувствительность ТАТБ сильно зависит от начальной плотности [1]. Поэтому ТАТБ по сравнению с другими ВВ (октоген, гексоген) обладает рядом ярко выраженных свойств [2]. ТАТБ, сжатый слабой ударной волной (УВ), с увеличением плотности за фронтом десенсибилизируется, т. е. становится менее чувствительным, — детонационная волна (ДВ) не распространяется в сжатую область заряда [3, 4]. Если при ударно-волновом нагружении происходит снижение плотности, например, в волнах разгрузки, то имеет место сенсibilизация ТАТБ, т. е. повышение ударно-волновой чувствительности [5–7].

Известно, что скорость детонации взрывчатых веществ зависит от кривизны фронта волны, которая связана с размером зоны химической реакции за фронтом [8, 9]. Существование критического и предельного диаметра для каждого ВВ является практическим подтверждением существования такой зависимости [10]. Например, для взрывчатого состава (ВС) на основе высокочувствительного октогена и низкочувствительного ТАТБ значения предельного диаметра сильно отличаются, так как сильно отличаются размеры зоны химической реакции. Следовательно, отличаются и зависимости скорости детонации от кривизны фронта. Для ВС на основе октогена эта зависимость слабая, а для ВС на основе ТАТБ — сильная. Это означает, что при описании распространения фронта ДВ в зарядах на основе октогена и гексогена цилиндрической или сферической формы в первом приближении можно пользоваться законами геометрической оп-

тики (по Гюйгенсу): в зоне прямой видимости точки инициирования — окружность, в области «тени» — эвольвента. Для ВС на основе ТАТБ законы геометрической оптики неприменимы. Большой материал по данному вопросу можно найти в работе [11]. Этой проблеме посвящено множество экспериментальных работ [12–17]. В большинстве указанных работ эксперименты проводятся в цилиндрической геометрии для более надежной регистрации формы фронта радиографическим методом. Численное описание выполненных экспериментов с использованием разных моделей кинетики детонации ТАТБ можно найти в работах [18, 19].

Настоящая работа продолжает исследования, описанные в [16], с некоторым изменением постановки экспериментов и численным моделированием полученных результатов.

1. 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 [20]. Изображения регистрировались на пакет из десяти фотохромных, расположенных друг за другом экранов из галогенида бария, активированного европием (Digital Complex for Computer Radiography, DC-CR). Итоговое рентгеновское изображение получалось суммированием 10 изображений по специально разработанному алгоритму [21]. 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 приведен эскиз экспериментальной сборки.

Исследуемые заряды из пластифицированного ВС на основе ТАТБ представляли собой фрагменты полого цилиндра наружного диаметра 120 мм, внутреннего диаметра 60 мм и высотой 60 мм, размер фрагментов составлял примерно 1/6, 1/2, 5/6 от размера полного кольца. Границы каждого фрагмента показаны на рис. 1 штриховыми линиями. Рентгенографирование проводилось вдоль оси цилиндра. На фрагментах $\approx 1/6$ и $\approx 1/2$ исследовалась начальная фаза распространения процесса, на фрагменте $\approx 5/6$ — распространение де-

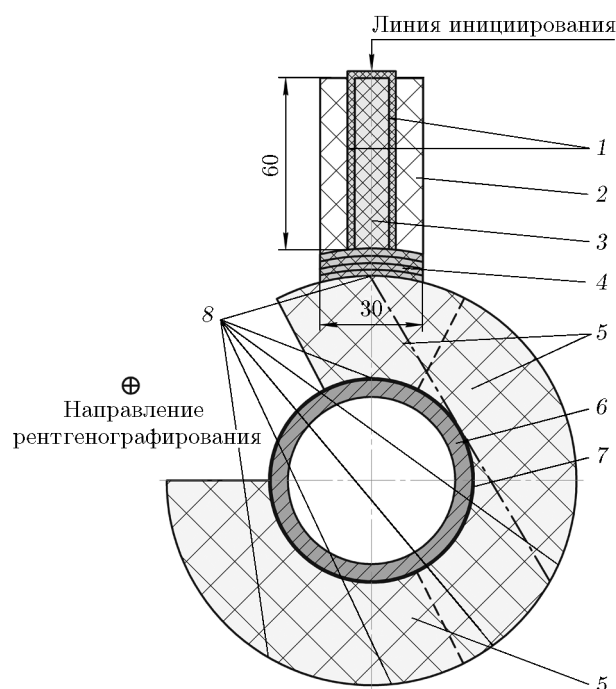


Рис. 1. Эскиз экспериментального блока:

1 — пластины из пластического ВС на основе тэна, 2 — пластина из пенопласта, 3 — пластина из ПММА, 4 — заряд из пластического ВС на основе гексогена, 5 — фрагмент полого цилиндрического заряда из ВС на основе ТАТБ, 6 — стальная оболочка, 7 — воздушный зазор, 8 — электроконтактный датчик

тонации на углы более 180° от плоскости инициирования, что и представляет особый интерес. Штрихпунктирная линия делит заряд на область прямой видимости точки инициирования и область «тени».

Заряд подрывался инициатором, состоящим из пластин пластического ВС на основе тэна толщиной 2 мм с расстоянием между пластинами 10 мм и из слоя пластического ВС на основе гексогена толщиной 8 мм (четыре слоя по 2 мм). Пластины на основе тэна инициировались по линии линейным генератором ДВ [22]. Слой из пластического ВС на основе гексогена инициировался по двум линиям одновременно, детонационные волны сталкивались внутри этого слоя, образуя в месте столкновения (линии) область повышенного давления. Детонация в заряде ТАТБ возникала при столкновении ДВ в слое по линии на наружной поверхности. Такая конструкция инициатора позволяет надежно и без задержки по времени инициировать нормальную детонацию с поверхности заряда ТАТБ. Внутрь заряда с за-

зором 0.5 мм помещалась стальная (Ст3) оболочка толщиной 5 мм. Толщина всех деталей сборки в направлении рентгенографирования 60 мм. Для контроля распространения детонации на наружной поверхности заряда и напротив инициатора устанавливались электроконтактные датчики в виде скрутки двух лакированных проводов диаметром 0.1 мм. Координаты расположения датчиков на внешней поверхности заряда определялись по предварительному рентгено снимку с точностью ≈ 0.2 мм.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исходные данные экспериментальных сборок и некоторые результаты опытов приведены в таблице. В опытах 1 и 2 исследовалась начальная фаза развития детонации от инициатора. В опытах 3–6 исследовалось распространение детонации в цилиндрическом заряде с оболочкой внутри при углах разворота фронта ДВ менее 180° , в опытах 7, 8 — более 180° .

На рис. 2 представлены характерные рентгено снимки, полученные в опытах. Качество изображений позволяет надежно определить форму фронта ДВ. Видно, что под инициатором форма фронта ДВ отличается от цилиндрической.

Исходные данные и некоторые результаты опытов

Номер опыта	ρ_0 , г/см ³	T , °C	t_γ , мкс	t , мкс	Форма образца
1	1.880	2	28.2	2.1	1/6
2	1.891	7	29.5	3.4	1/6
3	1.885	–15	32.4	6.3	1/2
4	1.886	–1	35.7	9.6	1/2
5	1.885	–2	37.7	11.6	1/2
6	1.885	1	39.8	13.5	1/2
7	1.891	4	46.9	20.8	5/6
8	1.880	11	48.6	22.5	5/6

Примечания. ρ_0 — начальная плотность заряда; T — температура окружающей среды в опыте; t_γ — время рентгенографирования, от момента подачи высоковольтного импульса в цепь электродетонатора (ЭД) до момента γ -импульса; $t = t_\gamma - t_{\text{ВВ}}$ — интервал времени между моментом выхода ДВ на поверхность ТАТБ в точке столкновения и моментом рентгенографирования, $t_{\text{ВВ}}$ — среднее время выхода ДВ на поверхность ТАТБ в точке столкновения ДВ, равное 26.1 мкс по данным нескольких опытов.

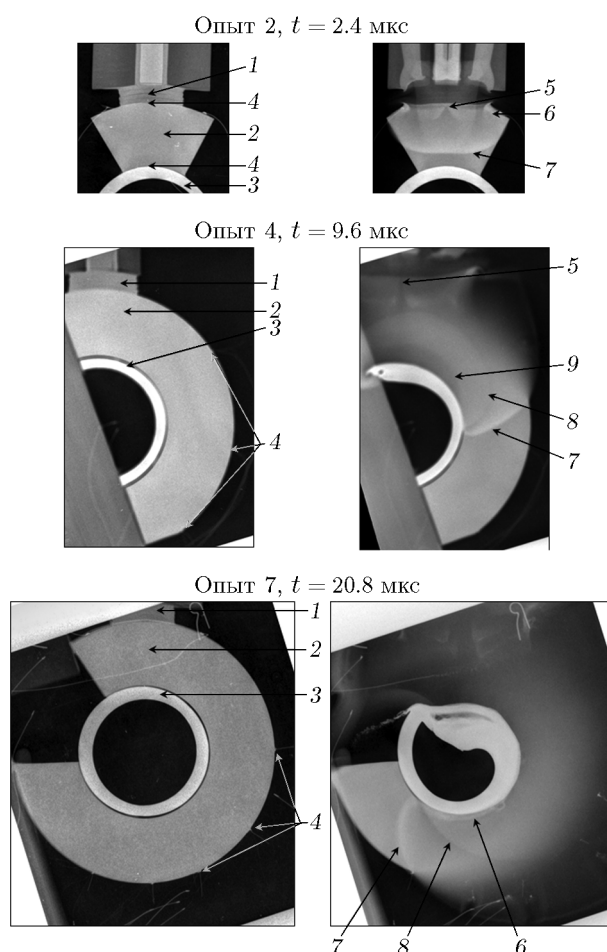


Рис. 2. Снимки, полученные в опытах: предварительный (слева) и взрывного процесса (справа):

1 — инициатор, 2 — заряд ТАТБ, 3 — оболочка, 4 — электроконтактный датчик, 5 — место столкновения ДВ в инициаторе — место иницирования заряда ТАТБ, 6 — зоны непрореагировавшего ТАТБ, 7 — фронт ДВ, 8 — фронт УВ в продуктах взрыва, 9 — область разгрузки

дрической. Это означает, что нельзя рассматривать инициатор как точечный. Детонация в ТАТБ возникает в месте столкновения ДВ в слое пластического ВС на основе гексогена; непосредственно под проекциями пластин пластического ВС на основе тэна в инициаторе детонация не возникает. Детонация распространяется преимущественно в направлении иницирования, в боковые стороны распространяется фронт УВ, что видно по образованию небольших зон непрореагировавшего ТАТБ («темные» зоны). Через некоторое время фронт детонации огибает вещество в этих областях. Указанная картина характерна для иницирования низкочувствительного ВС на основе ТАТБ

[23]. На рентгено снимках зарегистрировано место инициирования заряда ТАТБ по характерной структуре плотности продуктов взрыва за фронтом ДВ.

На полученных снимках в опыте 4 хорошо видна структура течения в продуктах взрыва за фронтом ДВ: отраженная от стальной оболочки УВ; голова волны разрежения от выхода УВ на внутреннюю границу оболочки. Эти данные могут быть использованы для калибровки уравнения состояния продуктов взрыва ТАТБ при численном моделировании экспериментов. В опыте 7 при угле разворота фронта ДВ $\approx 150^\circ$ около внутренней поверхности зафиксирован слой непрореагировавшего ТАТБ толщиной $2 \div 3$ мм и протяженностью ≈ 30 мм. Таким образом, при некоторой кривизне фронта ДВ зафиксирован, по-видимому, срыв детонации. В указанной области произошло затухание детонации — она трансформировалась в УВ, скорость которой ниже, чем скорость фронта ДВ. За фронтом УВ образовалась область сжатого непрореагировавшего вещества. Видно, что в момент регистрации фронт детонации уже обогнул эту область, так как нет характерного излома на фронте ДВ около поверхности оболочки.

3. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Форма и положение характерных областей на рентгеновских снимках оцифровывались методом функциональной трассировки [17]. В качестве начала координат выбран центр цилиндрического заряда.

На рис. 3 приведены положения фронтов ДВ и характерных границ в разные моменты времени. Числа рядом с расположением контактных датчиков — это время срабатывания контактных датчиков (мкс), линии — экспериментальная форма ДВ, УВ с указанием моментов рентгенографирования. Погрешность определения фронта ДВ по рентгеновскому снимку составляет ± 0.4 мм (2σ). Видно, что моменты срабатывания датчика, расположенного под зарядом ТАТБ напротив места инициирования, в опытах близки, что свидетельствует о стабильности инициирования.

Заряд ТАТБ на рис. 3 прямой линией разделен на область прямой видимости точки инициирования и область «тени».

На рис. 4 приведена $X-t$ -диаграмма движения фронта ДВ в плоскости инициатора.

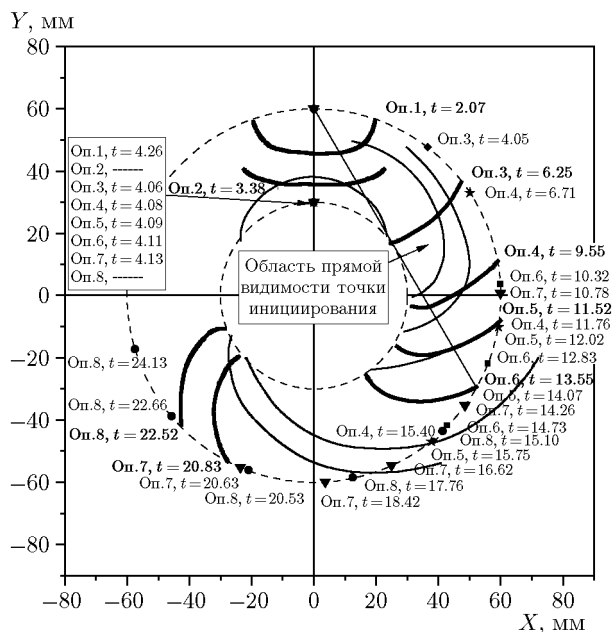


Рис. 3. Положение и форма фронта ДВ и характерных границ:

сплошные толстые линии — фронт ДВ, сплошные тонкие линии — фронт отраженной УВ в продуктах взрыва; время t указано в микросекундах

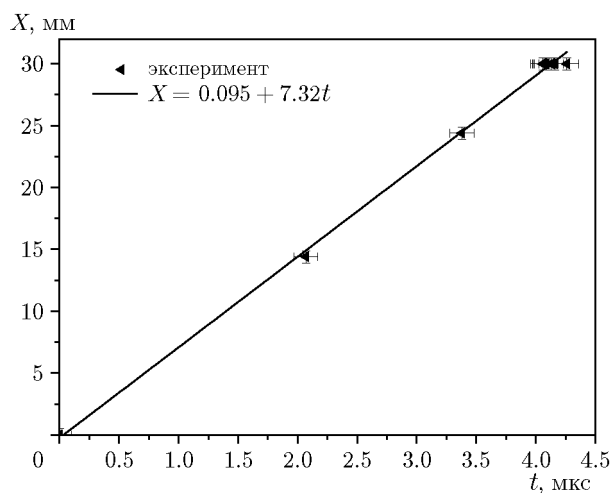
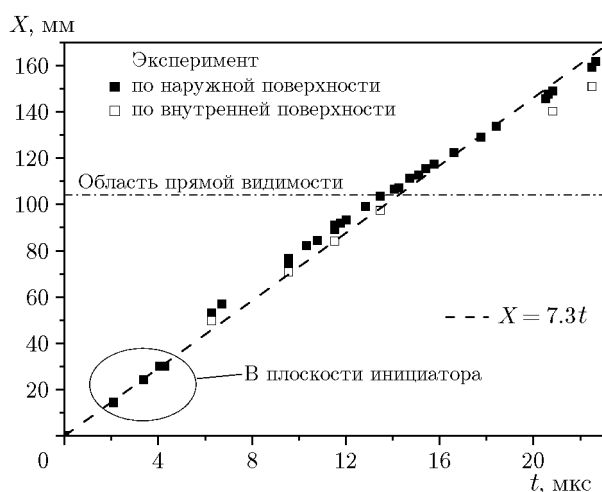


Рис. 4. $X-t$ -диаграмма движения фронта ДВ под инициатором

Экспериментальные точки хорошо описываются линейной зависимостью. Скорость фронта ДВ составляет ≈ 7.32 км/с, что является характерным значением для скорости расходящейся ДВ в ВС на основе ТАТБ.

На рис. 5 приведена суммарная $X-t$ -диаграмма движения ДВ по данным всех опытов. Экспериментальные точки получены при измерениях на наружной и внутренней по-

Рис. 5. X - t -диаграмма движения фронта ДВ

верхностях заряда. Скорость распространения фронта детонации по внутренней поверхности цилиндра меньше, чем по внешней. При $X \approx 160$ мм разница в положении фронта достигает ≈ 8 мм. По наружной поверхности заряда скорость распространения фронта детонации уменьшается до ≈ 6 км/с, по внутренней — до ≈ 5.6 км/с. Видно, что в расположении точек имеется особенность: данные в прямой видимости точки инициирования лежат выше прямой для скорости детонации 7.3 км/с. Это происходит из-за неточности инициатора. Скорость фронта волны, распространяющейся вбок от линии инициирования, выше, чем в плоскости инициатора, и составляет ≈ 8 км/с. Такое положение точек не соответствует процессу стационарной детонации.

По-видимому, на начальном этапе инициирования детонации при столкновении ДВ в инициаторе фронт ДВ в ТАТБ движется внутри области сжатого материала, границы которой перемещаются со скоростью фронта УВ — около 5 км/с. При этом в точке касания фронтом ДВ области сжатого материала детонация будет распространяться с большей скоростью, чем вдоль плоскости симметрии. Это приводит к более пологому фронту ДВ на начальном этапе, чем в предположении геометрической оптики. В дальнейшем ДВ огибает зону сжатого вещества, при этом форма фронта ДВ приобретает еще большие отличия от цилиндрической формы.

Анализ экспериментальных данных еще раз наглядно показывает, что описать процесс простой моделью распространения детонации по Гюйгенсу в данном случае невозможно. Тре-

буется численное моделирование экспериментов с привлечением кинетики детонации.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведено численное моделирование результатов опытов. Использовался комплекс программ МИМОЗА [24], который предназначен для решения двумерных и трехмерных нестационарных задач газовой динамики с учетом упругопластических свойств веществ и детонации. В методике МИМОЗА реализована модель кинетики детонации SURF [25] с небольшими изменениями, связанными с детектированием УВ. Ударная волна детектируется по вязкости, а не через функцию Гюгоньо, как в оригинальной работе. Расчеты проведены с использованием модели кинетики детонации SURF для ВС на основе ТАТБ. Параметры кинетики верифицировались по экспериментальной информации, полученной ранее.

Расчеты проводились в двумерном приближении в однообластной постановке на квадратной неподвижной (эйлеровой) сетке с шагом 0.1 мм. Для визуализации результатов расчетов использовалась программа IZOMIM [26]. При проведении расчетов на эйлеровой сетке все контактные границы в процессе счета рассчитывались на основе метода концентраций. В смешанных ячейках для каждого вещества хранятся плотность, внутренняя энергия и доля занимаемого объема.

Начальная геометрия для расчета опытов приведена на рис. 6 (изокарта плотности). На внешних границах области задавалось граничное условие — свободная поверхность.

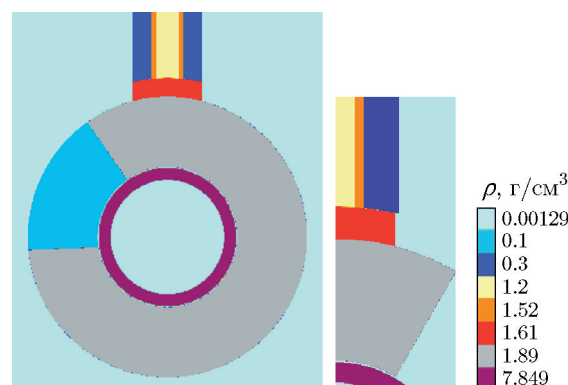


Рис. 6. Начальная геометрия для расчета результатов опытов

Для ВС и неэнергетических материалов использовались уравнения состояния в форме Ми — Грюнайзена, для продуктов взрыва — в форме В. Н. Зубарева [27]. Давление откола для всех материалов, кроме стали, принималось равным нулю. В расчетах для стали учитывались упругопластические свойства. Различные материалы выделялись концентрациями веществ.

Режим детонации в пластических ВС на основе тэна и на основе гексогена предполагался идеальным (модель Чепмена — Жуге); расчет идеальной детонации проводился с использованием программы контроля скорости ДВ.

При моделировании экспериментов важным параметром, характеризующим ВС, является ударно-волновая чувствительность. Для ВС на основе ТАТБ ударно-волновая чувствительность существенно зависит от начальной плотности составов. В комплексе программ МИМОЗА экспериментальные данные о зависимости длины преддетонационного участка L [см] от начальной плотности были обобщены в виде

$$\ln L(\rho_0) = 11.75 - 54.9(1.91 - \rho_0) - \\ - (3.54 - 12.35(1.91 - \rho_0)) \ln(p_{гр}),$$

где ρ_0 — начальная плотность заряда на основе ТАТБ, г/см³, а $p_{гр}$ — нагружающее давление, ГПа. Зависимость выполняется в диапазоне плотности ВС $\rho_0 = 1.85 \div 1.91$ г/см³. В программе варьируются параметры кинетики детонации, откалиброванные под приведенную зависимость.

На рис. 7 представлены полученные в результате расчетов изокарты плотности в характерные моменты времени. Со стороны, противоположной точке инициирования, в области, примыкающей к стальной оболочке, при $t \approx 14.5 \div 20.5$ мкс зафиксирован срыв детонации: скорость фронта резко уменьшается, имеет место излом фронта волны, за фронтом нет продуктов взрыва, а присутствует сжатое вещество. После $t \approx 20.5$ мкс фронт детонации огибает образовавшуюся область сжатого вещества и распространяется дальше без излома. При этом надо отметить, что около оболочки не образуется область с непрореагировавшим веществом, все вещество за фронтом со временем прореагировало.

Рис. 8 позволяет наглядно сравнить результаты численного моделирования с экспери-

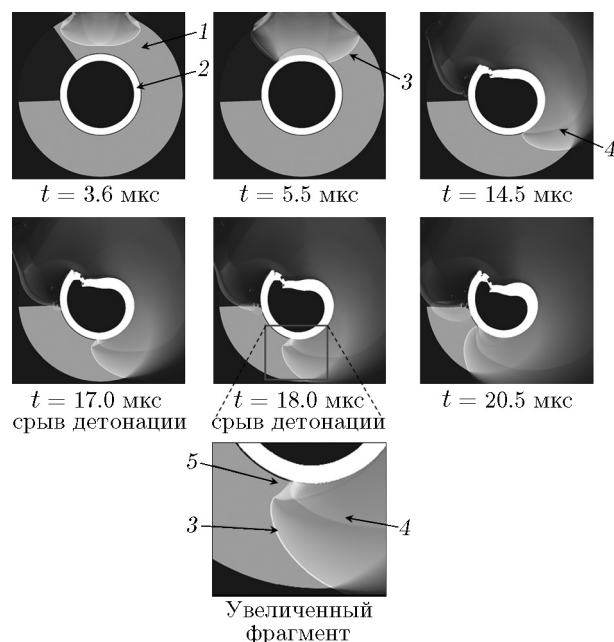


Рис. 7. Результаты численного моделирования опыта 7:

1 — заряд ТАТБ, 2 — оболочка, 3 — фронт ДВ, 4 — фронт УВ в продуктах взрыва, 5 — фронт УВ при срыве детонации

ментом. В целом наблюдается хорошее согласие по описанию положения фронта ДВ. Однако видны и некоторые отличия. На начальной фазе процесса инициирования размеры «темных» зон в расчете несколько больше, чем в эксперименте. Фронт ДВ дольше по времени будет огибать большую по размеру область непрореагировавшего вещества. Это может привести в расчете к отставанию по времени фронта ДВ от эксперимента при описании положения фронта ДВ на наружной поверхности заряда до угла разворота $\approx 90^\circ$.

На рис. 9 приведены расчетные и экспериментальные положения фронтов ДВ и отраженной УВ в продуктах взрыва в разные моменты времени. Видно, что в случае ДВ форма и положение фронта в опытах и расчете хорошо согласуются между собой, а в случае отраженной от стальной оболочки УВ в продуктах хорошо согласуются до места срыва детонации, после чего в расчете фронт УВ отходит на большее расстояние от оболочки, чем в эксперименте. Это может быть связано с тем, что в эксперименте образуется область непрореагировавшего вещества, которая существует длительное время, а в расчете, хотя и имеет место срыв детонации, вещество за фронтом УВ со временем дореагирует.

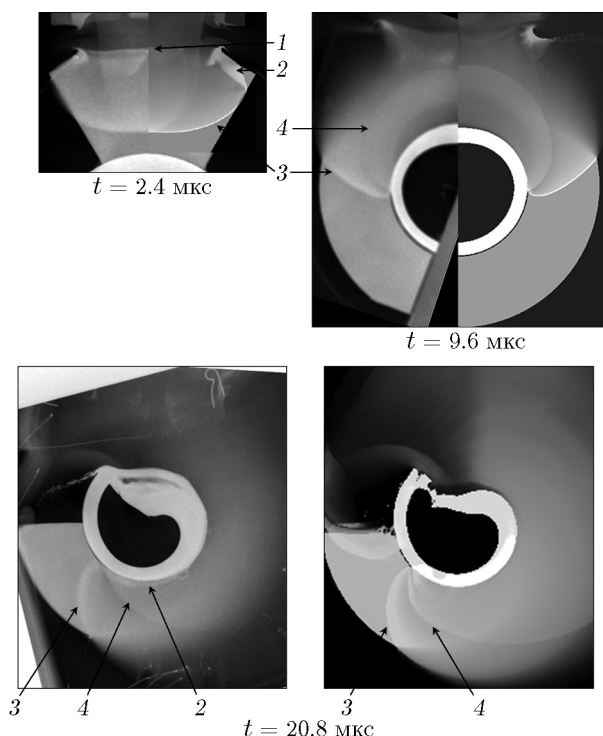


Рис. 8. Сравнение результатов расчетов (справа) и экспериментов 2, 4, 7 (слева):

1 — место столкновения ДВ в инициаторе — место инициирования заряда ТАТБ, 2 — зоны непрореагировавшего ТАТБ, 3 — фронт ДВ, 4 — фронт УВ в продуктах взрыва

На рис. 10 приведена $X-t$ -диаграмма движения фронта ДВ при распространении по внутренней и внешней поверхностям цилиндрического заряда по результатам расчета опыта 7 и по данным всех экспериментов. Наблюдается хорошее согласие между расчетом и экспериментом. В расчете в области срыва детонации, где фронт ДВ трансформируется в УВ, скорость меняется с 7.3 до 5 км/с. В экспериментах эта область не была выделена и является предметом дальнейших исследований. Кроме того, планируется провести подобные эксперименты с варьированием начальной плотности зарядов из ТАТБ в широком диапазоне значений с использованием протонографического комплекса [28].

На рис. 10 наибольшее отличие результатов расчета по данным опыта 7 ($\rho_0 = 1.891 \text{ г/см}^3$) от экспериментов наблюдается на $X-t$ -диаграмме на начальном участке ($X = 50 \div 60 \text{ мм}$) для опытов 3 и 4 ($\rho_0 = 1.885 \text{ г/см}^3$). По-видимому, так проявляется влияние начальной плотности заряда ТАТБ.

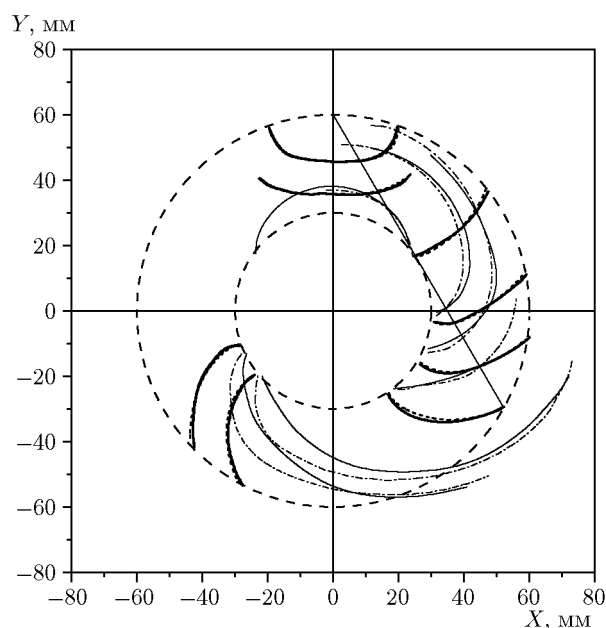


Рис. 9. Сравнение результатов расчетов и экспериментов:

фронт ДВ: сплошная толстая линия — эксперимент, штриховая — расчет; фронт отраженной УВ в продуктах взрыва: сплошная тонкая линия — эксперимент, штрихпунктирная — расчет.



Рис. 10. Сравнение результатов всех экспериментов (точки) и расчета (линии) по данным опыта 7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование формы и положения фронта ДВ рентгенографическим методом в процессе распространения детонации во фрагментах полого цилиндрического заряда из пластифицированного ТАТБ со стальной оболочкой внутри при ини-

циировании нормальной детонации по линии на наружной поверхности. С помощью электроконтактных датчиков измерена скорость распространения фронта ДВ по наружной поверхности заряда. Оригинальная постановка экспериментов позволила исследовать распространение детонации на углы более 180° от линии инициирования.

Показано, что конструкция инициатора обеспечивает надежное возбуждение нормальной детонации на поверхности заряда ТАТБ с минимальной временной задержкой. Экспериментальное положение фронта ДВ не описывается законами геометрической оптики (по Гюйгенсу) из-за особенностей инициирования детонации на начальном участке. В плоскости инициатора скорость фронта расходящейся ДВ составляет ≈ 7.3 км/с. В области «тени» точки инициирования скорость фронта расходящейся ДВ уменьшается в зависимости от пройденного расстояния как по наружной поверхности заряда — до ≈ 6 км/с, так и по внутренней — до ≈ 5.6 км/с. При этом около стальной оболочки в области углов разворота фронта ДВ $\approx 150 \div 210^\circ$ зафиксирована зона непрореагировавшего ТАТБ, которая может свидетельствовать о срыве детонации и трансформации ее в ударную волну.

Проведено численное моделирование экспериментов в двумерном приближении по методике МИМОЗА с использованием кинетики детонации SURF. Получена схожая с экспериментом картина инициирования и распространения детонации в заряде ТАТБ. В расчете наблюдается хорошее согласие с экспериментальными данными по форме и положению фронта ДВ. В расчете в области углов разворота фронта $\approx 170 \div 200^\circ$ около поверхности стальной оболочки зафиксирован срыв детонации. При этом скорость фронта уменьшается до значения ≈ 5 км/с, имеет место излом фронта волны, за фронтом нет продуктов взрыва, а присутствует сжатое вещество. После этого фронт детонации огибает образовавшуюся область сжатого вещества и распространяется дальше без излома. Около оболочки не остается области с непрореагировавшим веществом, все вещество за фронтом со временем прореагировало, что не соответствует эксперименту. Как следствие из этого, в области срыва детонации форма и положения фронта ДВ в продуктах взрыва в расчете и в эксперименте не совпадают. Это ставит вопрос о проведении дополнительных экс-

периментов с варьированием начальной плотности заряда ТАТБ в широком диапазоне значений и с использованием многокадрового протонного ускорителя.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального центра физики и математики по государственному контракту № Н.4ц.241.4Д.23.1085.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

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. — (Препр. / РФЯЦ-ВНИИЭФ).
4. Бурцев В. В., Михайлов А. Л., Панов К. Н., Руднев А. В., Сырунин М. А. Исследование инициирования детонации во взрывчатом веществе на протонном ускорителе У-70 // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 3. — С. 115–121. — EDN: OGBHIN.
5. 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.
6. Комрачков В. А., Панов К. Н., Целиков И. С. Изменение ударно-волновой чувствительности пластифицированных ТАТБ и октогена при разгрузке в зазор // VII Харитоновские тематические науч. чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. — С. 179–187.
7. Плаксин И. Е., Герасимов В. М., Шутков В. И. и др. Переходные процессы взрывчатого превращения в ВВ на основе ТАТБ: развитие и затухание взрыва при воздействии

- сталкивающимися волнами и ударными волнами плоской геометрии — однократными и двукратными с промежуточной разгрузкой // Симпоз. по энергетическим материалам, США, Ливермор, 1994.
8. **Wood W. W., Kirkwood J. G.** Diameter effect in condensed explosive. The relation between velocity and radius of curvature of the detonation wave // *J. Chem. Phys.* — 1954. — V. 22, N 11. — P. 1920–1924. — DOI: 10.1063/1.1739940.
 9. **Кобылкин И. Ф., Шабанов В. М., Соловьев В. С.** К вопросу об извлечении кинетики разложения ВВ из формы фронта стационарной детонационной волны // *Физика горения и взрыва*. — 1992. — Т. 28, № 5. — С. 87–90.
 10. **Кобылкин И. Ф., Соловьев В. С., Бойко М. М.** Критический диаметр стационарной детонации высокоплотных ВВ. Влияние оболочки // *Физика горения и взрыва*. — 1983. — Т. 19, № 4. — С. 120–123.
 11. **Литвинов Б. В., Лобойко Б. Г., Филин В. П., Костицын О. В., Любятинский С. Н., Смирнов Е. Б.** Зоны реакции и распространение детонации в твердых взрывчатых веществах // Б. В. Литвинов. Избранные труды / под ред. Е. Н. Аврорина. — Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2014. — С. 595–599.
 12. **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 // 11th Int. Detonation Symp., Snowmass, Colorado, USA, 1998. — P. 1023–1028.
 13. **Bdzil J. B., Fickett W., Stewart D. S.** Detonation shock dynamics: A new approach to modeling multidimensional detonation waves // 9th Int. Detonation Symp., Portland, USA, 1989. — P. 730–742.
 14. **Matignon C., Sorin R., Bozier O.** Detonation propagation of converging front in IHE: Comparison of direct numerical simulation and detonation shock dynamics against experimental data // 14th Int. Detonation Symp., USA, 2010. — P. 1182–1190.
 15. **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 // *AIP Conf. Proc.* — 2004. — V. 706. — P. 859–862. — DOI: 10.1063/1.1780372.
 16. **Ерастов А. В., Панов К. Н.** Исследование распространения детонации в полукольцевых зарядах из ТАТБ методом импульсной рентгенографии // *Физика горения и взрыва*. — 2019. — Т. 55, № 5. — С. 109–115. — DOI: 10.15372/FGV20190513. — EDN: ELASXO.
 17. **Terrones G., Burkett M. W., Morris C., Oro D. M.** Cyclops Experiment (U) // LA-UR-10-04469. — Los Alamos Nat. Lab., 2010.
 18. **Володина Н. А., Ерастов А. В., Забуров П. В., Кирюхина М. Н., Панов К. Н., Титова В. Б., Ширшова М. О.** Особенности инициирования и распространения детонации в цилиндрическом заряде из ТАТБ // XXI Харитоновские тематические науч. чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2019.
 19. **Hughes J. M., Terrones G., Shores E. F.** Cyclops I: Modeling Error Study for Inertially Confined Detonation of Insensitive High Explosive (IHE) PBX-9502. — Rep. LA-UR-17-28074. — Los Alamos Nat. Lab., 2018.
 20. **Невозмущающие** методы диагностики быстротекущих процессов / под ред. А. Л. Михайлова. — Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015.
 21. **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.
 22. **US Pat. 3242863A.** Explosive line wave generator / Gipson D. H. — Publ. 29.03.1966.
 23. **Бурцев В. В., Комрачков В. А., Ковтун Д. А., Панов К. Н., Руднев А. В., Сырунин М. А.** Исследование инициирования детонации ТАТБ методом протонной радиографии // *Физика горения и взрыва*. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 107–114. — EDN: UHYSVT.
 24. **Змушко В. В., Токтохоев Ч. О., Шамраев Б. Н.** Кинетика возбуждения детонации высокочувствительных ВВ // XIX Харитоновские тематические науч. чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2017. — Т. 1. — С. 43–48.
 25. **Menikoff R., Shaw M. S.** Reactive burn models and ignition & growth concept // *EPJ Web of Conf.* — 2010. — V. 10. — 00003. — DOI: 10.1051/epjconf/20101000003.
 26. **Змушко В. В.** IZOMIM. Программа графической обработки двумерных задач в комплексе программ МИМОЗА // Докл. на Международном семинаре супервычислений и математического моделирования. — Саров, 2002.
 27. **Зубарев В. Н., Евстигнеев А. А.** Уравнение состояния продуктов взрыва конденсированных ВВ // *Физика горения и взрыва*. — 1984. — Т. 20, № 6. — С. 114–126.
 28. **Антипов Ю. М., Афонин А. Г., Василевский А. В. и др.** Радиографическая установка ускорителя протонов с энергией 70 ГэВ ГНЦ ИФВЭ // Приборы и техника эксперимента. — 2010. — № 3. — С. 5–12.

Поступила в редакцию 20.12.2022.
После доработки 08.02.2023.
Принята к публикации 01.03.2023.