

УДК 519.6

## ОСОБЕННОСТИ ИНИЦИРОВАНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ЗАРЯДЕ ИЗ ТАТБ

Н. А. Володина, А. В. Ерастов, П. В. Забусов, М. Н. Кирюхина,  
К. Н. Панов, В. Б. Титова, М. О. Ширшова

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, [pvzabusov@ifv.vniief.ru](mailto:pvzabusov@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. В экспериментах определена форма фронта детонационной волны рентгенографическим методом в разные моменты времени. В опытах зафиксировано влияние на форму детонационного фронта слоя из пластического взрывчатого вещества на основе гексогена, расположенного на поверхности основного заряда и имеющего скорость детонации на  $\approx 10\%$  выше, чем у ТАТБ. Экспериментальное 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. Проведено численное моделирование экспериментов по методике ЛЭГАК с использованием макроскопической кинетики детонации. Получена схожая с экспериментом картина инициирования и распространения детонации в заряде ТАТБ. Проведен расчетно-теоретический анализ особенностей распространения детонационной волны.

Ключевые слова: кинетика детонации, ТАТБ, рентгенографическая методика, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV2023.9340  
EDN PUCOSB

### ВВЕДЕНИЕ

Распространение детонации в малочувствительном взрывчатом веществе (ВВ) 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), десенсибилизируется, т. е. становится менее чувствительным — детонационная волна (ДВ) не распространяется в ударно-сжатую область заряда [3]. Если при ударно-волновом нагружении плотность снижается, например, в волнах разгрузки, то имеет место сенсибилизация ТАТБ, т. е. повышение ударно-волновой чувствительности [4–6].

Известно, что для многих ВВ скорость детонации зависит от кривизны фронта волны. Существование критического и предельно-

го диаметра для каждого ВВ является практическим подтверждением существования такой зависимости. Для составов на основе октогена и ТАТБ значения предельного диаметра сильно отличаются. Следовательно, сильно отличаются и зависимости скорости детонации от кривизны фронта. Для составов на основе октогена эта зависимость слабая, а 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 фронт — это 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 взрывного превращения [7–10]. В большинстве указанных работ эксперименты проводятся в цилиндрической геометрии для более надежной регистрации формы фронта радиографическим методом.

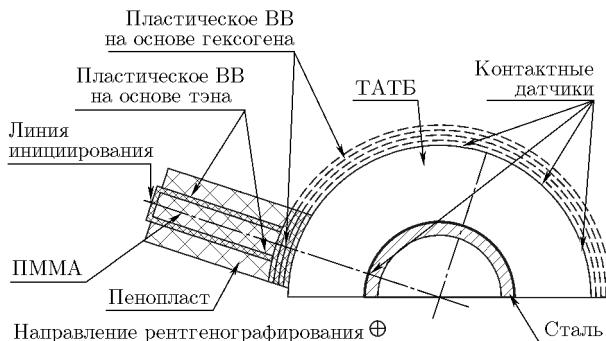


Рис. 1. Эскиз экспериментального блока

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

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА

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, расположенных друг за другом. Итоговое рентгеновское изображение получалось путем суммирования десяти изображений по специально разработанному алгоритму [12]. На рис. 1 представлен эскиз экспериментальной сборки.

Полуцилиндрический заряд из пластифицированного ТАТБ размером  $\varnothing 120 \times \varnothing 60$  мм подрывался с помощью инициатора, состоящего из листов пластического ВВ на основе тэна толщиной 2 мм, которые инициировались по линии линейным генератором ДВ, и слоя из пластического ВВ на основе гексогена толщиной 8 мм (четыре слоя по 2 мм). Расстояние между пластинами из тэна составляло 10 мм. 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 имеют толщину 60 мм. Для контроля распространения детонации по наружной поверхности заряда и на против инициатора устанавливались контакт-

ные датчики в виде скрутки двух лакированных проводов диаметром 0.1 мм. Координаты расположения датчиков определялись по предварительному рентгеновскому снимку с точностью  $\approx 0.2$  мм.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

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

В опыте 1 исследовался процесс развития детонации от инициатора на заряде ТАТБ в виде параллелепипеда, в опытах 2–4 — процесс распространения детонации в полуцилиндрическом заряде со стальной оболочкой внутри. В опытах 5–7 исследовалось влияние слоя пластического ВВ на основе гексогена на форму фронта при распространении детонации в полуцилиндрическом заряде.

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 устанавливались контактные датчики K1–K4, представляющие собой отрезки скрученной проволоки, которые располагались вдоль направления рентгенографирования и видны на снимках в виде точек. Время работы инициатора определялось по данным датчика K1, который устанавливался в месте столкновения ДВ в слое, и составило 24.61 мкс. Моменты срабатывания остальных датчиков: K2 — 27.38 мкс, K3 — 24.36 мкс, K4 — 27.51 мкс. Из полученных рентгеновских снимков видно, что детонация в ТАТБ возникает в месте столкновения детонационных волн в слое. Непосредственно под листами из пластического ВВ на основе тэна в инициаторе детонация в ТАТБ 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. Снимок наглядно иллюстрирует влияние слоя с большей скоростью детонации, чем в ТАТБ, на распространение детонации в цилиндрическом заряде.

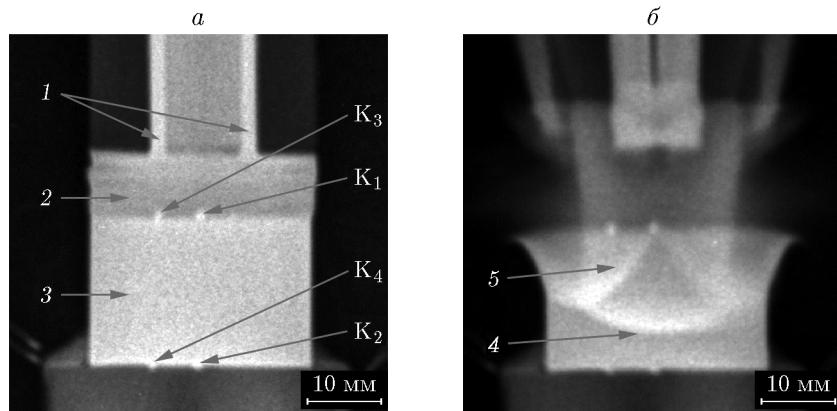
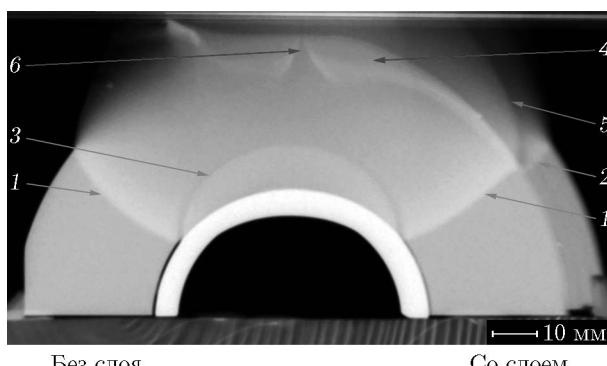


Рис. 2. Рентгеновские снимки опыта 1:

а — предварительный снимок, б — снимок взрывного процесса,  $t = 2.0$  мкс; 1 — листы пластического ВВ на основе тэна, 2 — слой пластического ВВ на основе гексогена, 3 — образец ТАТБ, 4 — фронт ДВ, 5 — зона непрореагированного ТАТБ; К1-К4 — контактные датчики

Рис. 3. Снимки взрывного процесса в опыте 7,  $t = 30.86$  мкс:

1 — фронт ДВ в ТАТБ, 2 — фронт ДВ в слое, 3 — фронт отраженной УВ в продуктах взрыва ТАТБ, 4 — зона непрореагированного ТАТБ, 5 — фронт отраженной УВ в продуктах взрыва слоя, 6 — линия инициирования детонации в ТАТБ

На рис. 4 приведены рентгеновские снимки взрывного процесса в опытах 4 и 6. На снимках хорошо видна структура течения в продуктах взрыва за фронтом ДВ: отраженная УВ от стальной оболочки; голова волны разрежения от выхода УВ 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 ТАТБ, на распространение детонации. Так как скорость фронта ДВ в слое пластического ВВ выше, чем в ТАТБ, то на начальном участке распространения процесс «весь

дется» фронтом детонации слоя. Это приводит к тому, что фронт ДВ в ТАТБ имеет форму, отличную от случайной, если бы слоя не было. В месте, где фронт детонации в заряде ТАТБ догоняет фронт детонации в слое (из-за разницы длин путей), это влияние прекращается, 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 непрореагированного ТАТБ, детонация в которую не распространяется и которая уменьшается до нуля по мере распространения процесса.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 5 приведены положения фронта 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. Цифры рядом с расположением контактных датчиков — это моменты срабатывания контактных датчиков, линии на графиках — экспериментальная форма ДВ с указанием момента рентгенографирования. Погрешность определения фронта ДВ по рентгеновскому снимку составляет  $\pm 0.4$  мм ( $2\sigma$ ). На представленном графике наглядно видно влияние слоя пластического ВВ на основе гексогена на форму фронта ДВ в ТАТБ. Это влияние проявляется сильнее на начальном участке

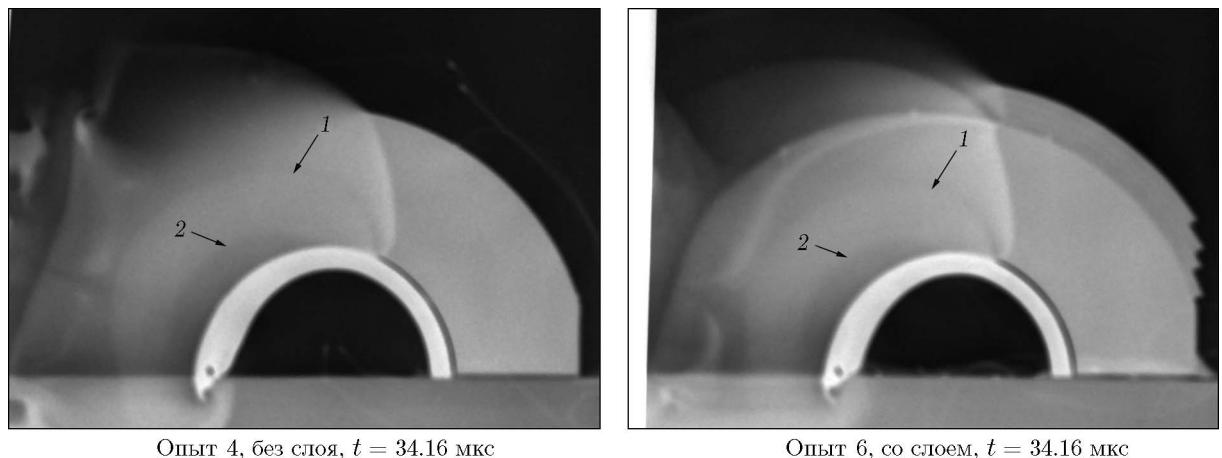
Опыт 4, без слоя,  $t = 34.16$  мксОпыт 6, со слоем,  $t = 34.16$  мкс

Рис. 4. Влияние слоя:

1 — фронт отраженной УВ, 2 — голова волны разрежения

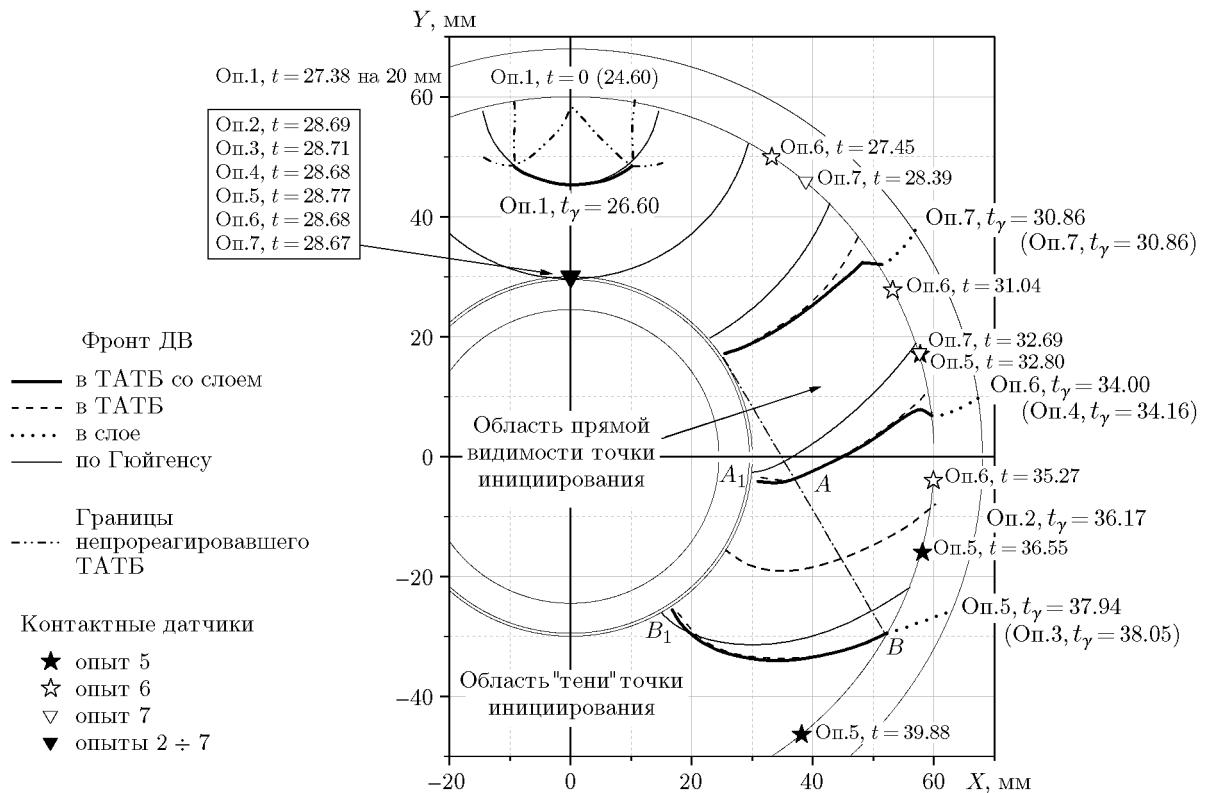


Рис. 5. Форма фронта ДВ:

 $t$  — момент срабатывания датчика, мкс,  $t_\gamma$  — момент рентгенографирования, мкс

процесса и прекращается в месте, где фронт ДВ в ТАТБ догоняет фронт ДВ в слое. Штрихом (вдоль прямой  $AB$ ) выделена граница области прямой видимости точки инициирования.

На рис. 5 приведены рассчитанные по Гюйгенсу положения фронтов ДВ при скоро-

сти ДВ 7.4 км/с в характерные моменты времени: в моменты рентгенографирования и в момент выхода ДВ на противоположную инициированию поверхность заряда. В зоне прямой видимости точки инициирования фронт — это окружность, в зоне «тени» — эвольвента.

Видно, что под инициатором имеется хорошее согласие между расчетом по Гюйгенсу и экспериментом. С внешней стороны заряда детонация в эксперименте приходит значительно раньше, чем в расчете (фронт должен находиться за первым контактным датчиком в опыте 7). На начальном этапе инициирования детонации при столкновении детонационных волн в инициаторе фронт ДВ в ТАТБ движется внутри области ударно-сжатого материала, границы которой перемещаются со скоростью фронта УВ  $\approx 5$  км/с. При этом в точке касания фронтом ДВ области ударно-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 детонация огибает зону ударно-сжатого вещества, при этом отличие формы фронта ДВ от цилиндрической формы становится еще больше.

Из рис. 5 видно, что экспериментальное положение фронта ДВ отличается от расчета по Гюйгенсу не только вблизи наружной поверхности заряда, но и в области взаимодействия ДВ со стальной оболочкой. В промежутке времени  $26.6 \div 30.86$  мкс происходит увеличение скорости детонации, которое, по-видимому, связано с перескакиванием режимом распространения детонации 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. Если рассчитать расстояние, которое прошла детонация между двумя моментами рентгенографирования ( $\approx 34$  мкс в опыте 6 и  $\approx 38$  мкс в опыте 5), в зоне «тени»  $A_1-B_1$  и в зоне прямой видимости (по касательной)  $A-B$ , то получим различные значения — 25.9 и 29.9 мм соответственно. При этом средняя скорость детонации на этом участке составит 6.5 и 7.5 км/с. Рассчитанное по Гюйгенсу положение фронта ДВ в зоне прямой видимости отстает от эксперимента, а 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.

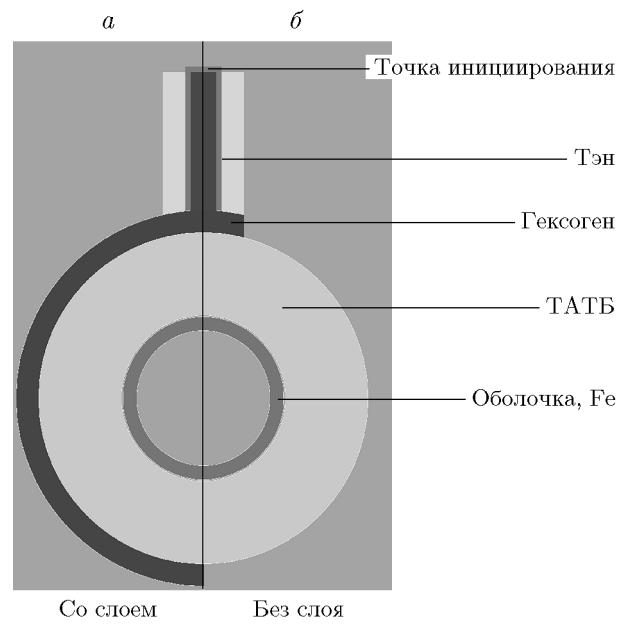


Рис. 6. Начальная геометрия расчетов

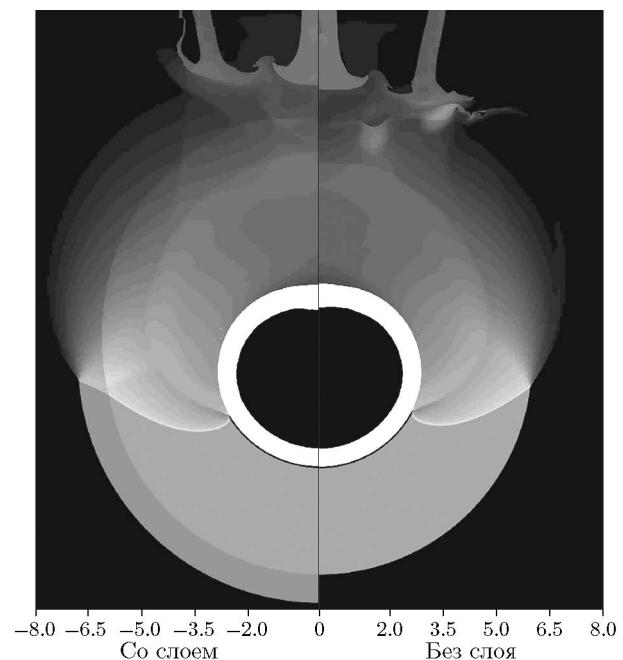


Рис. 7. Расчетное поле плотности

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты проводились по методике ЛЭГАК [13, 14] на квадратной эйлеровой сетке с шагом  $h = 0.01$  см в плоской двумерной постановке. Схемы начальной геометрии в расчетах приведены на рис. 6. На внешних границах области задавалось граничное условие — свободная поверхность.

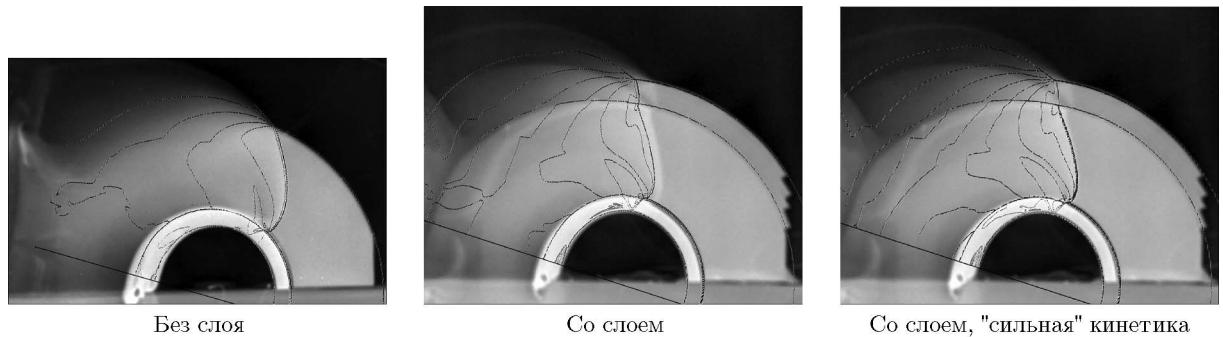


Рис. 8. Сравнение результатов расчета и эксперимента

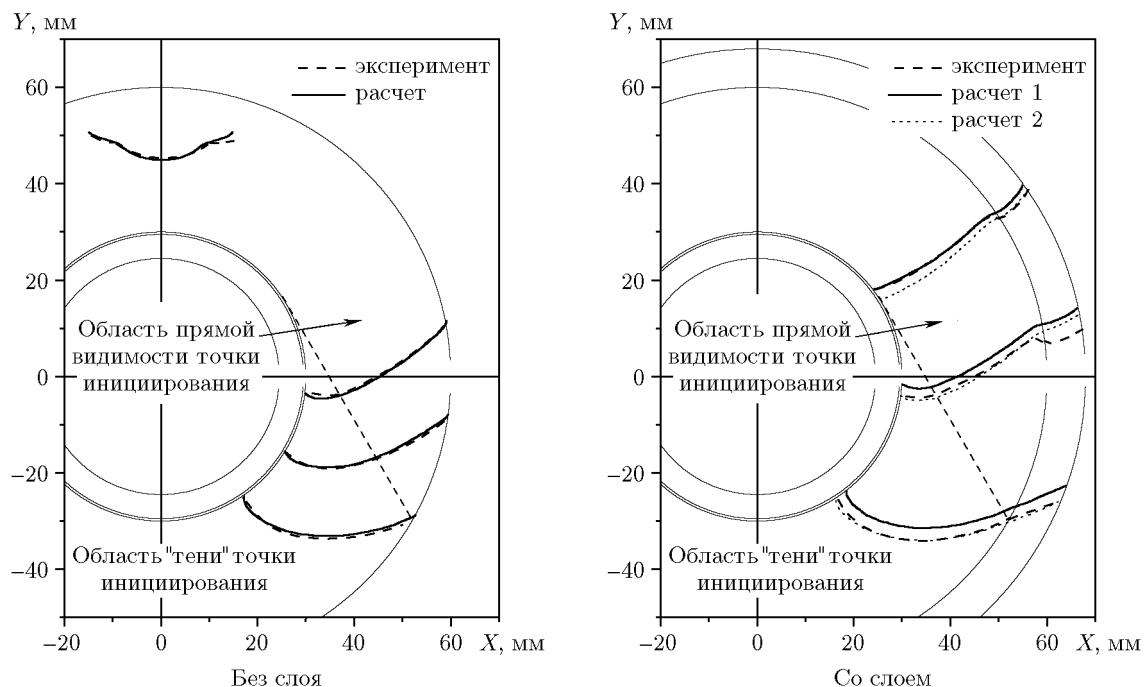


Рис. 9. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Инициирование накладного инициатора осуществлялось в центральной точке (линии, см. рис. 6), а процесс распространения детонации в нем моделировался как идеальный. Процесс возникновения и распространения детонации в слое гексогена и в исследуемом образце ТАТБ моделировался с использованием макроскопической кинетики [15, 16] с параметрами, верифицированными по совокупности экспериментальной информации, полученной ранее.

На рис. 7 приведено расчетное поле плотности при наличии слоя гексогена и без него в один из характерных моментов времени. В расчетах привязка по времени проводилась по данным опыта 1. На рис. 8 и 9 показано сравнение расчета и эксперимента. Видно, что расчет

в случае без слоя гексогена хорошо согласуется с экспериментом. При наличии слоя гексогена на поверхности заряда ТАТБ расчетное положение фронта хуже согласуется с опытом. Варьированием параметров кинетики для гексогена за счет увеличения его ударно-волновой чувствительности удалось добиться удовлетворительного согласия. При этом параметры кинетики разложения ТАТБ оставались неизменными.

Пока с помощью численного моделирования не удалось описать структуру течения вещества за фронтом ДВ. В эксперименте зафиксировано (см. рис. 3, 4), что непосредственно под слоем гексогена детонация в ТАТБ не возникает, в заряде ТАТБ существует область

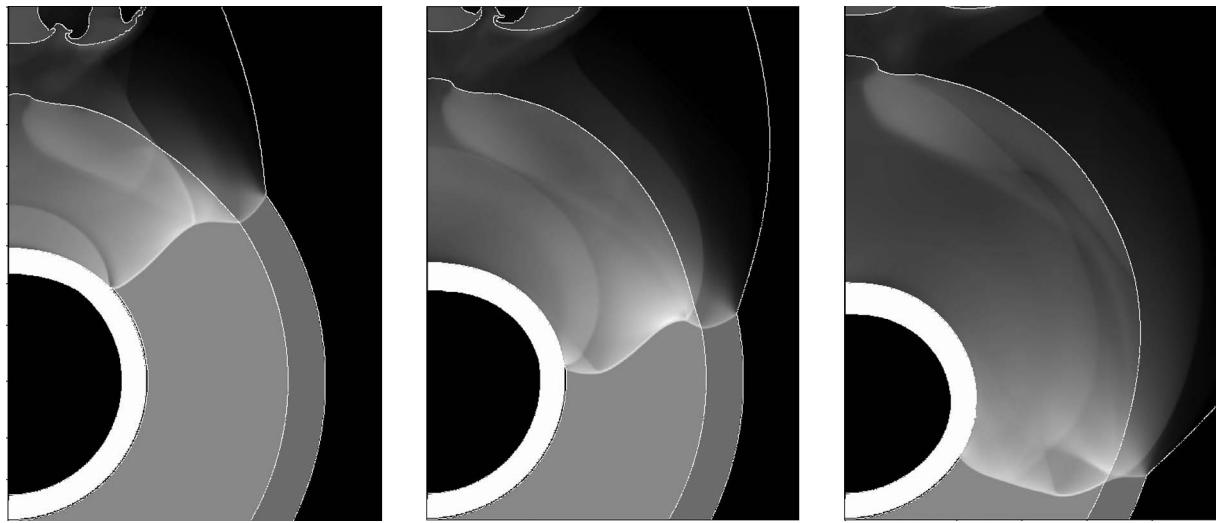


Рис. 10. Расчетное поле плотности при увеличении начальной плотности ТАТБ

ударно-сжатого непрореагировавшего ТАТБ. В продуктах взрыва при детонации слоя гексогена виден фронт отраженной УВ. В расчете этих особенностей не получено. Трудности численного моделирования опытов со слоем гексогена связаны со сложным характером начальной стадии инициирования детонации — детонационной волны необходимо в ограниченной зоне совершить поворот на  $\approx 90^\circ$ , сменив радиальное направление распространения на тангенциальное. При этом происходит задержка инициирования нормальной детонации и остается зона невыгоревшего гексогена. Величина задержки и размер зоны неизвестны, поскольку начальный этап распространения детонации не был зафиксирован на рентгенографических снимках. Это вносит дополнительную погрешность к временной привязке результатов расчетов к экспериментальным данным. Кроме того, набор констант для макроскопической кинетики не откалиброван для конкретного состава на основе гексогена, использовавшегося в описываемых опытах.

В макроскопическую кинетику введена зависимость чувствительности состава от начальной плотности. В предположении, что есть некоторая погрешность в измерении начальной плотности образца ВВ, в расчетах проведено ее варьирование (рис. 10). Получено, что при увеличении начальной плотности всего на 3 % в заряде формируется область ударно-сжатого непрореагировавшего ТАТБ, детонация в которую не распространяется, что полностью воспроизводит картину формирования детонации

в эксперименте. Это привело авторов к новому направлению исследований — изучение влияния начальной плотности и способа прессования ВВ в зарядах сложной формы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования формы фронта ДВ рентгенографическим методом 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 из пластического ВВ на основе гексогена, расположенного на поверхности заряда ТАТБ, на процесс распространения детонации.

Экспериментальное положение и форма фронта ДВ в заряде из 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 увеличивается из-за пересжатого режима. При обтекании детонацией стальной оболочки в области «тени» точки инициирования скорость фронта уменьшается.

Проведено численное моделирование экспериментов по методике ЛЭГАК с исполь-

зованием макроскопической кинетики детонации. Получена схожая с экспериментом картина инициирования и распространения детонации в заряде ТАТБ. В расчете без слоя гексогена наблюдается хорошее согласие с экспериментальными данными. В расчете при наличии слоя гексогена на поверхности заряда ТАТБ удалось добиться удовлетворительного согласия как при варьировании параметров кинетики детонации гексогена, так и при увеличении начальной плотности ТАТБ. Это ставит вопрос о проведении дополнительных экспериментов по исследованию особенностей развития детонации в гексогене, что, возможно, позволит описать особенности течения вещества за фронтом ДВ на границе заряда ТАТБ и слоя гексогена. Предложено новое направление исследований — изучение влияния начальной плотности и способа прессования ВВ в зарядах сложной формы.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета РФЯЦ-ВНИИ экспериментальной физики.

## 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. 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. Андреев С. Г., Бойко М. М., Соловьев В. С. Инициирование ВВ при ступенчатом нагружении // Физика горения и взрыва. — 1976. — Т. 12, № 1. — С. 113–116.
5. Комрачков В. А., Панов К. Н., Целиков И. С. Изменение ударно-волновой чувствительности пластифицированных ТАТБ и октогена при разгрузке в зазор // VII Харитоновские темат. науч. 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 сталкивающимися волнами и ударными волнами плоской геометрии — однократными и двукратными с промежуточной разгрузкой // Симпоз. по энергетическим материалам, Ливермор США, 1994.
7. Zhao T., Li Q., Zhao F., Sun C., Han L., He Z., Gao W. 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. — Р. 1023–1028.
8. Bdzil J. B., Fickett W., Stewart D. S. Detonation shock dynamics: A new approach to modeling multi-dimensional detonation waves // Proc. of the 9th Int. Symp. on Detonation, Portland, USA, 1989. — Р. 730–742.
9. 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 // Proc. of the 14th Int. Symp. on Detonation, USA, 2010. — Р. 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 // AIP Conf. Proc.: Shock Compression of Condensed Matter, Portland, Oregon, USA, July 20–25, 2003. — V. 706. — Р. 859–862. — DOI: 10.1063/1.1780372.
11. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих 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.
13. Бахрах С. М., Спиридовон В. Ф., Шанин А. А. Метод расчета течений неоднородной среды в лагранжево-эйлеровых координатах // Докл. АН СССР. — 1984. — № 4. — С. 829–833.
14. Бахрах С. М., Величко С. В., Спиридовон В. Ф. и др. Методика ЛЭГАК-3Д расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее

- реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. — 2004. — Вып. 4. — С. 41–50.
15. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Куратов С. Е., Соколов С. С., Шамраев Б. Н., Дмитриева Л. В. Теоретическое обоснование феноменологической модели ударноволновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ // Хим. физика. — 1995. — Т. 14, № 2-3. — С. 32–39.
16. Бахрах С. М., Володина Н. А., Зайцева М. О., Карпенко И. И., Ковтун А. Д., Комрачков В. А., Макаров Ю. М., Морозов В. Г., Рябчун Л. А. Экспериментальное и численное исследование развития процесса детонации ВВ типа ТАТБ // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. — 2005. — Вып. 1. — С. 41–56.

*Поступила в редакцию 07.04.2023.  
Принята к публикации 24.05.2023.*