

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

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

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

### Аннотация

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 (ДВ) рентгенографическим методом на несколько моментов времени. В опытах зафиксировано влияние на форму детонационного фронта слоя из пластического взрывчатого вещества (ПВВ) на основе гексогена, расположенного на поверхности основного заряда и имеющего скорость детонации на ~ 10 % выше, чем у ТАТБ. 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 наличием стальной оболочки. Проведено численное моделирование экспериментов по программе ЛЭГАК с использованием кинетики детонации МК. Получена схожая с экспериментом картина инициирования и распространения детонации в заряде ТАТБ. Проведен расчетно-теоретический анализ особенностей распространения детонационной волны.

### I. Введение

Распространение детонации в малочувствительном ВВ на основе ТАТБ представляет исключительный интерес. Известно, что ТАТБ имеет сильную зависимость ударно-волновой чувствительности от начальной плотности [1]. Поэтому ТАТБ, по сравнению с другими ВВ (октоген, гексоген), обладает рядом ярко выраженных свойств [2]. ТАТБ, сжатый слабой УВ, десенсибилизируется, т.е. становится менее чувствительным - детонационная волна не распространяется в ударно-сжатую область заряда [3]. Если при ударно-волновом нагружении происходит снижение плотности, например, в волнах разгрузки, то имеет место сенсibilизация ТАТБ, т.е. повышению ударно-волновой чувствительности [4], [5], [6].

Известно, что для многих ВВ имеется зависимость скорости детонации от кривизны фронта волны. Существование критического и предельного диаметра для каждого ВВ является практическим подтверждением существования такой зависимости. Для составов на основе октогена и ТАТБ значения предельного диаметра сильно отличаются. Следовательно, имеет место сильное отличие в 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 – 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], [8], [9], [10]. В большинстве указанных работ эксперименты проводятся в цилиндрической геометрии для более надежной регистрации формы фронта радиографическим методом.

Цель работ: исследование процесса инициирования и распространения детонации в полумоноцилиндрическом заряде из пластифицированного ТАТБ и определение влияния наружного слоя из ПВВ на основе гексогена с большей, чем у ТАТБ скоростью детонации, на форму фронта ДВ.

### II. Экспериментальная постановка

Опыты проводились на импульсной рентгеновской установке "Эридан-3" с мягким спектром

излучения с граничной энергией  $E_{\gamma} \sim 1$  Мэв, длительностью  $\Delta t \sim 0,05$  мкс и размером фокуса 2 мм [11]. Регистрация изображения проводилась на пакет из десяти фотохромных экранов расположенных друг за другом. Итоговое рентгеновское изображение получалось путем суммирования 10 изображений по специально разработанному алгоритму [12]. На рисунке 1 представлен эскиз экспериментальной сборки.

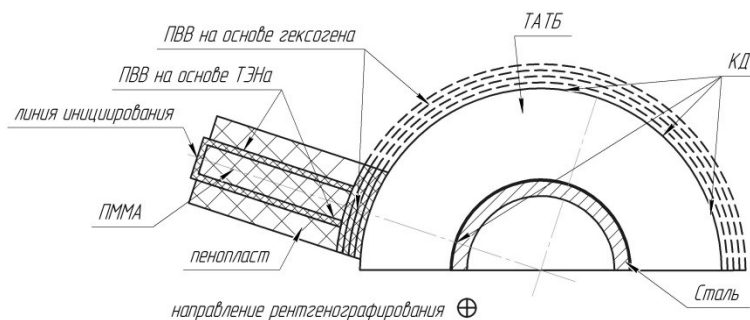


Рисунок 1. Эскиз экспериментального блока

Полуцилиндрический заряд из пластифицированного ТАТБ размером  $\varnothing 120 \times \varnothing 60$  мм подрывался с помощью инициатора, состоящего из листов ПВВ на основе ТЭНа толщиной 2 мм, которые инициировались по линии линейным генератором детонационной волны, и слоя из ПВВ на основе гексогена толщиной 8 мм (четыре слоя по 2 мм). Расстояние между пластинами из ТЭНа составляет 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 на наружной поверхности заряда и напротив инициатора устанавливались контактные датчики в виде скрутки двух лакированных проводов  $\varnothing 0,1$  мм. Координаты расположения датчиков определялись по предварительному рентгено снимку с точностью  $\sim 0,2$  мм.

### III. Результаты экспериментов

Проведено две серии экспериментов. В первой серии экспериментов слой из ПВВ на основе гексогена устанавливался непосредственно под инициатором (опыт №1÷№4), во второй – на всей наружной поверхности заряда из ТАТБ (опыт №5÷№7) (см. рисунок 1).

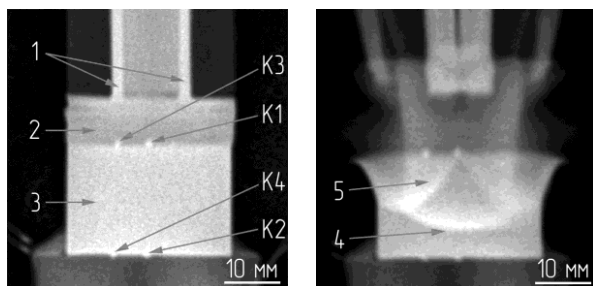
В опыте №1 исследовался процесс развития детонации от инициатора на заряде из ТАТБ в виде параллелепипеда. В опытах №2, 3, 4 исследовался процесс распространения детонации в полуцилиндрическом заряде со стальной оболочкой внутри. В опытах №5, 6, 7 исследовалось влияние слоя из ПВВ на основе гексогена на форму фронта при распространении детонации в полуцилиндрическом заряде.

На рисунке 2 приведен предварительный снимок и снимок взрывного процесса в опыте №1. Заряд из ТАТБ представлял собой параллелепипед высотой 20 мм, шириной 30 мм и толщиной на просвет 60 мм. На поверхности заряда устанавливались контактные датчики К1÷К4 в виде отрезков скрученной проволоки, которые располагались вдоль направления рентгенографирования и видны на снимках в виде точек. Время работы инициатора определялось по данным датчика К1, который устанавливался в месте столкновения ДВ в слое, и составило 24,61 мкс. Моменты срабатывания остальных датчиков составили: К2-27,38 мкс; К3-24,36 мкс; К4-27,51 мкс. Из полученных рентгено снимков видно, что детонация в ТАТБ возникает в месте столкновения ДВ в слое. Непосредственно под листами из ПВВ на основе ТЭНа в инициаторе детонация в ТАТБ не возникает.

На рисунке 3 приведен рентгено снимок взрывного процесса в опыте №7. Инициатор в опыте №7 устанавливался посередине заряда из ТАТБ. В одной половине слой из ПВВ на основе гексогена присутствовал, в другой нет. Из рентгено снимка наглядно видно влияние слоя с большей

скоростью детонации, чем в ТАТБ, на процесс распространения детонации в цилиндрическом заряде.

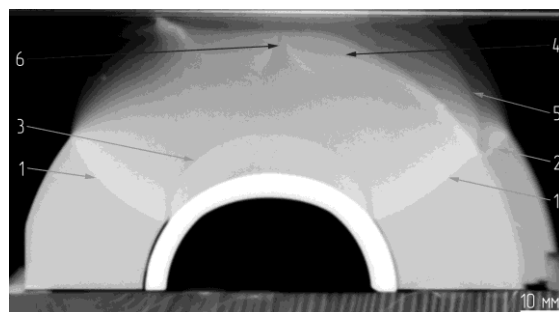
На рисунке 4 приведены рентгено снимки взрывного процесса в опытах №4 и №6. На полученных снимках хорошо видна структура течения в продуктах взрыва (ПВ) за фронтом ДВ: отраженная УВ от стальной оболочки; голова волны разрежения от выхода УВ на внутреннюю границу оболочки. Эти данные могут быть использованы для калибровки уравнения состояния ПВ ТАТБ. На рентгено снимках зафиксировано влияние слоя из ПВВ на основе гексогена, расположенного на поверхности заряда ТАТБ, на процесс распространения детонации. Так как скорость фронта ДВ в слое из ПВВ выше, чем в ТАТБ, то, на начальном участке распространения, процесс "ведется" фронтом детонации слоя. Это приводит к тому, что фронт ДВ в ТАТБ имеет форму, отличную от случая, если бы слоя не было. В месте догона фронтом детонации в заряде ТАТБ фронта 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 непрореагировавшего ТАТБ, детонация в которую не распространяется, и которая уменьшается до нуля по мере распространения процесса.



а) Предварительный снимок      б) Снимок взрывного процесса,  $t=2,00$  мкс

1 - листы из ПВВ на основе ТЭНа;  
2 - слой из ПВВ на основе гексогена,  
3 - образец ТАТБ, 4 - фронт ДВ,  
5 - зона непрореагировавшего ТАТБ;  
K1-4 - контактные датчики

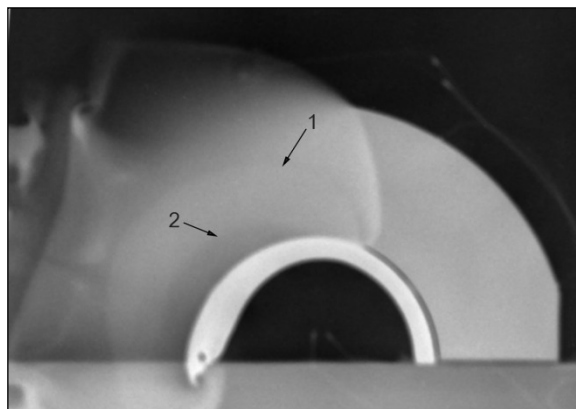
**Рисунок 2.** Рентгено снимки опыта №1



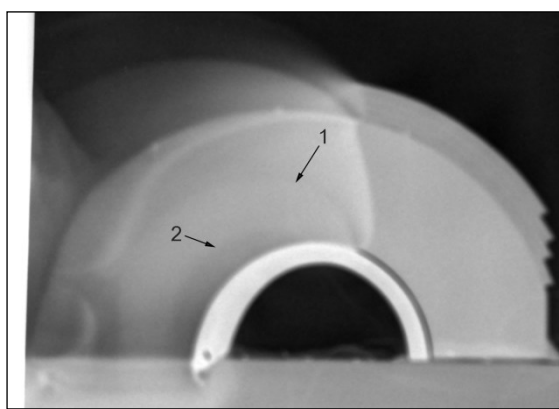
Без слоя      Со слоем

1 - фронт ДВ в ТАТБ; 2 - фронт ДВ в слое;  
3 - фронт отраженной УВ в продуктах взрыва (ПВ) ТАТБ; 4 - зона непрореагировавшего ТАТБ;  
5 - фронт отраженной УВ в ПВ слоя;  
6 - линия инициирования детонации в ТАТБ

**Рисунок 3.** Снимки взрывного процесса в опыте №7,  $t=6,25$  мкс



Опыт №4, без слоя,  $t=9,55$  мкс



Опыт №6, со слоем,  $t=9,39$  мкс

1 - фронт отраженной УВ; 2 - голова волны разрежения

**Рисунок 4.** Влияние слоя

#### IV. Обсуждение и анализ результатов

На рисунке 5 приведены положение фронтов ДВ на разные моменты времени. Для удобства анализа и построения графиков точка инициирования расположена, в отличие от приведенных рентгено снимков, сверху и имеет координаты  $X=0$  мм,  $Y=60$  мм. Цифры рядом с расположением контактных датчиков - это моменты срабатывания контактных датчиков, линии на графиках – экспериментальная форма ДВ с подписями моментов рентгенографирования. Погрешность определения фронта ДВ по рентгено снимку составляет  $\pm 0,4$  мм ( $2\sigma$ ). На представленном графике наглядно видно влияния слоя из ПВВ на основе гексогена на форму фронта ДВ в ТАТБ. Это влияние проявляется сильнее на начальном участке процесса и прекращается в месте догона фронтом ДВ в ТАТБ фронта ДВ в слое. Пунктиром выделена граница области прямой видимости точки инициирования.

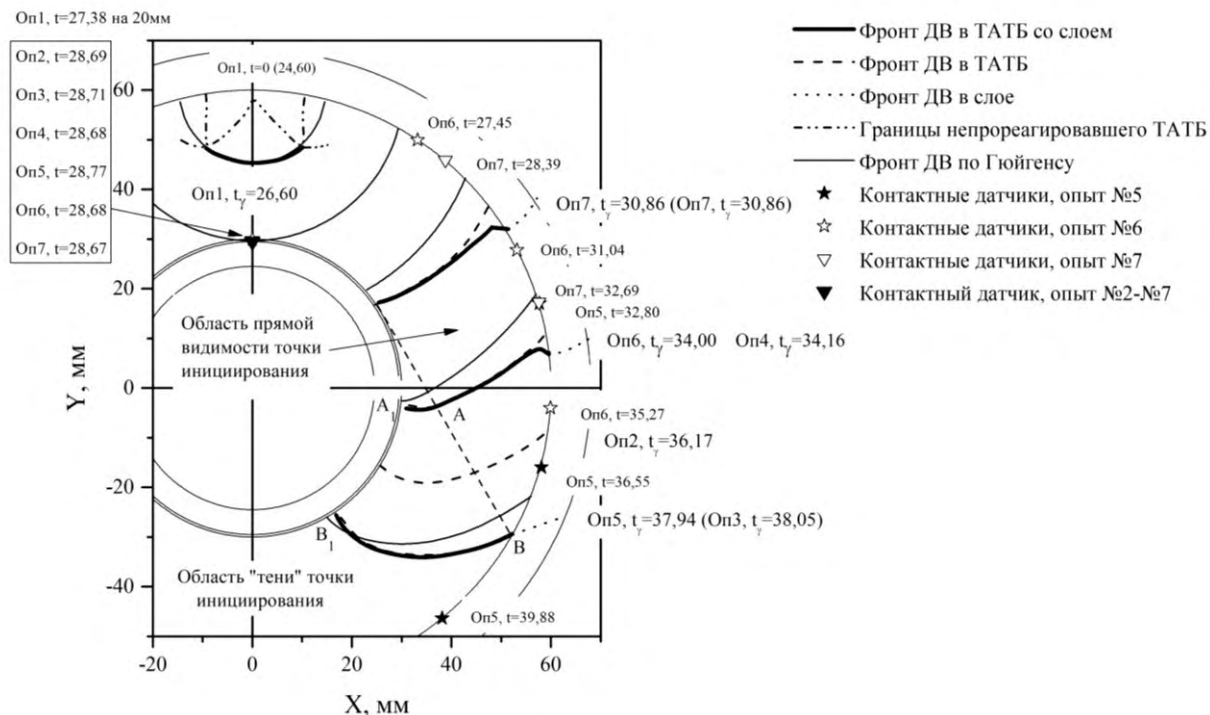


Рисунок 5. Форма фронта ДВ

На рисунке 5 приведены расчетные по Гюйгенсу положение фронтов ДВ при скорости ДВ 7,4 км/с на характерные моменты времени: на моменты рентгенографирования; на момент выхода ДВ на противоположную инициированию поверхность заряда. В зоне прямой видимости точки инициирования 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 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 УВ -  $\sim 5$  км/с. При этом, в точке касания фронта 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 форма фронта ДВ претерпевает еще большие отличия от цилиндрической формы.

Из рисунка 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 26,6-30,86 мкс происходит увеличение скорости детонации, которое, по-видимому, связано с перескатым 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.

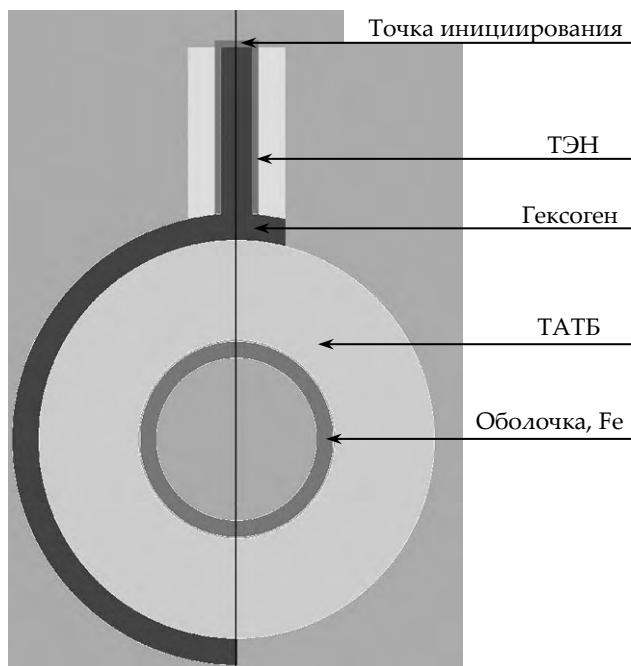
В области "тени" точки инициирования фронт ДВ движется с замедлением. Если рассчитать расстояние, которая прошла детонация между двумя моментами рентгенографирования (опыт №6≈34 мкс и опыт №5≈38 мкс), в зоне "тени" А1-В1 и в зоне прямой видимости (по касательной) А-В, то получим разные значения - 25,9 мм и 29,9 мм, соответственно. При этом средняя скорость детонации на этом участке составит 6,5 км/с и 7,5 км/с. Расчетное по Гюйгенсу положение фронта ДВ в зоне прямой видимости отстает от эксперимента, в зоне "тени", в точке касания оболочки опережает эксперимент. Это свидетельствует об уменьшении скорости детонации при обтекании фронтом ДВ оболочки в области "тени" точки инициирования.

### V. Результаты численного моделирования

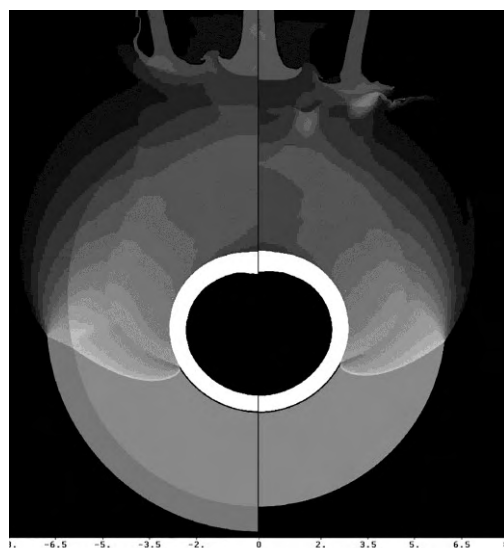
Расчеты проводились по методике ЛЭКАК [13], [14] на квадратной эйлеровой сетке с шагом  $h=0,01$  см в плоской двухмерной постановке. Схемы начальной геометрии в расчетах приведены на рисунке 6. На внешних границах области задавалось граничное условие – свободной поверхности.

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

На рисунке 7 приведено расчетное поле плотности при наличии слоя из гексогена и без него на один из характерных моментов времени. В расчетах привязка по времени проводилась по данным опыта №1. На рисунке 8 и 9 проведено сравнение расчета и эксперимента. Видно, что в расчете без слоя гексогена наблюдается хорошее согласие с экспериментальными данными. 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 (расчет 2) удалось добиться удовлетворительного согласия. При этом параметры кинетики для ТАТБ оставались неизменными.



а) со слоем, б) без слоя  
Рисунок 6. Начальная геометрия расчетов



а) со слоем, б) без слоя  
Рисунок 7. Расчетное поле плотности

Пока с помощью численного моделирования не удалось описать структуру течения вещества за фронтом ДВ. В эксперименте зафиксировано (см. рисунок 3, 4), что непосредственно под слоем гексогена детонация в ТАТБ не возникает, в заряде ТАТБ существует область ударно сжатого непрореагировавшего ТАТБ. В продуктах взрыва при детонации слоя гексогена виден фронт отраженной УВ. В расчете этих особенностей получено не было. Трудности численного моделирования опытов со слоем гексогена связаны со сложным характером начальной стадии инициирования детонации – детонационной волне необходимо в ограниченной зоне совершить поворот на  $\approx 90^\circ$ , сменив радиальное направление распространения на тангенциальное. При этом происходит задержка в инициировании 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 этого, набор констант для кинетики МК не откалиброван для конкретного состава на основе гексогена, использовавшегося в описываемых опытах

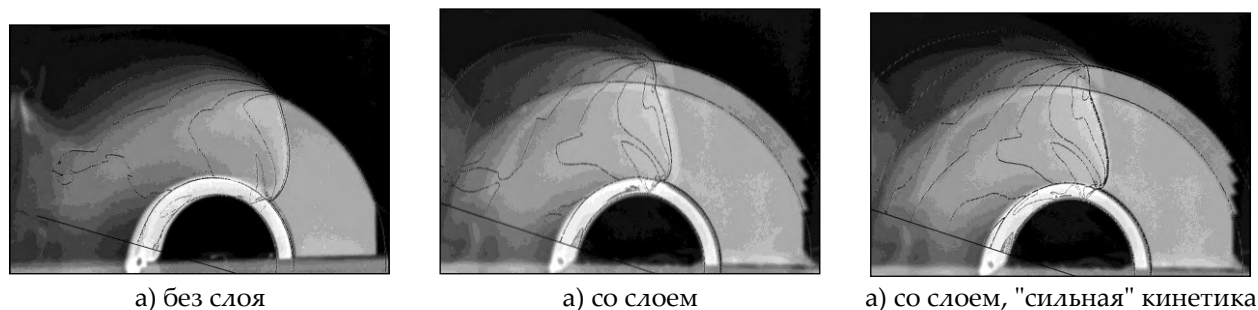


Рисунок 7. Сравнение расчета и эксперимента

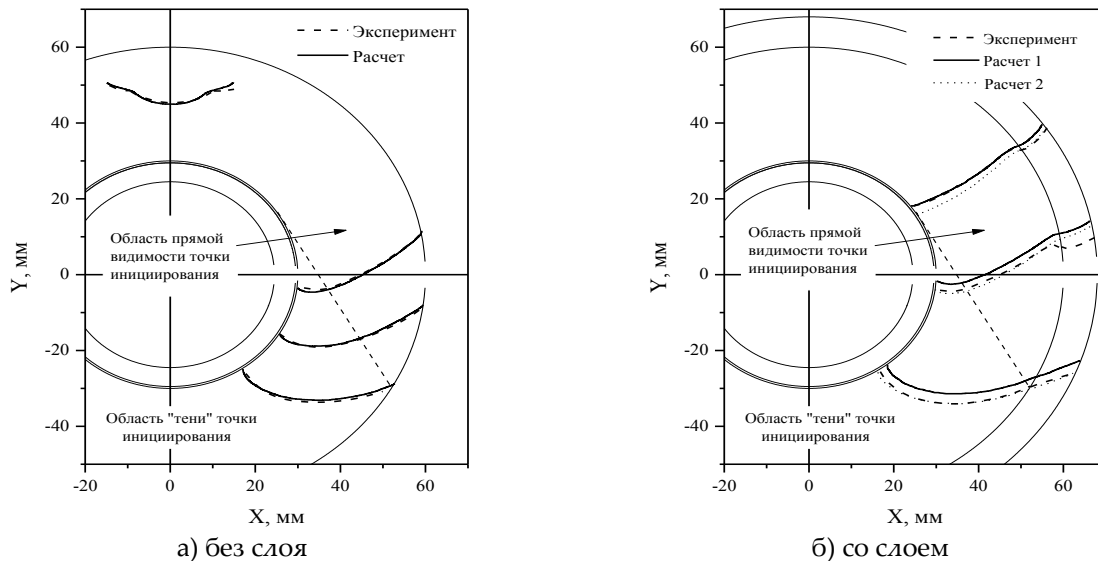


Рисунок 8. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

## Заключение

Проведены экспериментальные исследования по определению 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 ПВВ 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 происходит увеличение скорости детонации из-за пересжатого режима. При обтекании детонацией стальной оболочки в области "тени" точки инициирования происходит уменьшение скорости фронта.

Проведено численное моделирование экспериментов по программе ЛЭГАК с использованием кинетики детонации МК. Получена схожая с экспериментом картина инициирования и распространения детонации в заряде ТАТБ. В расчете без слоя гексогена наблюдается хорошее согласие с экспериментальными данными. При наличии слоя гексогена на поверхности заряда ТАТБ удалось добиться удовлетворительного согласия в расчете при варьировании параметров кинетики детонации гексогена. 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.

### Список литературы

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. В.Г. Морозов, И.И. Карпенко, Ковтун А.Д., В.А. Комрачков 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. Препринт. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 1995. С. 37-95.
4. С.Г. Андреев, М.М. Бойко, В.С. Соловьев Инициирование ВВ при ступенчатом нагружении // Физика горения и взрыва. Т.12, №1. 1976г.
5. В.А. Комрачков, К.Н. Панов, И.С. Целиков Изменение ударно-волновой чувствительности пластифицированных ТАТБ и октогена при разгрузке в зазор// Труды международной конференции VII Харитоновские тематические научные чтения. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С 179-187.
6. И.Е. Плаксин, В.М. Герасимов, В.И. Шутов 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 // Симпозиум по Энергетическим Материалам. США. Ливермор. 1994г.
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 International Detonation Symposium, Snowmass, Colorado, USA, 1998, pp. 1023-1028.
8. Bdzil, J. B., Fickett, W. and Stewart, D. S. Detonation shock dynamics: A new approach to modeling multidimensional detonation waves, Ninth International Detonation Symposium, Portland, USA, 1989, pp. 730-42.
9. Christophe Matignon, Rémy Sorin and Olivier Bozier Detonation Propagation of Converging Front in IHE: Comparison of Direct Numerical Simulation and Detonation Shock Dynamics against Experimental Data. Fourteenth International Detonation Symposium, USA, 2010, pp. 1182-1190.
10. S.N. Lubyatinsky, S.V. Batalov, A.Yu. Garmashev, V.G. Israelyan, O.V. Kostitsyn, B.G. Loboiko, V.A. Pashentsev, V.A. Sibilev, E.B. Smirnov, V.P. Filin. Detonation propagation in 180° ribs of an insensitive high explosive. Shock Compression of Condensed Matter, Portland, Oregon, July 20-25, 2003.

11. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / Под ред. Доктора техн. наук А.Л. Михайлова. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2015.
12. В.А. Аринин, Б.И. Ткаченко Применение проективных преобразований при метрологической обработке изображений. Труды РНТОРЭС имени А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. Выпуск VII-2. 2006. С.464.
13. С.М. Бахрах, В.Ф. Спиридонов, А.А. Шанин Метод расчета течений неоднородной среды в лагранжево-эйлеровых координатах // ДАН СССР. 1984. В.4, С. 829-833.
14. С.М. Бахрах, С.В. Величко, В.Ф. Спиридонов И др. Методика ЛЭГАК-3D 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. В.Г. Морозов, И.И. Карпенко, С.Е. Куратов, С.С. Соколов, Б.Н. Шамраев, Л.В. Дмитриева, "Теоретическое обоснование феноменологической модели ударноволновой чувствительности ВВ на основе ТАТБ". "Химическая физика", том 14, N 2-3, 1995.
16. С.М. Бахрах, Н.А. Володина, М.О. Зайцева, И.И. Карпенко, А.Д. Ковтун, В.А. Комрачков, Ю.М. Макаров, В.Г. Морозов, Л.А. Рябчун 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.

## МЕТОД КАЛОРИМЕТРИИ ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ

*А.Л. Верещагин, Н.В. Бычин, Е.А. Петров*

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного  
технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

Для изучения возможности определения энергосодержания детонационных наноалмазов (ДНА) предлагается использовать метод реакционной калориметрии с использованием метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Реакции СВС протекают при температурах не менее чем при 1500 – 1700 °С, что ограничивает возможности применения стандартных инструментальных методов для изучения механизма и термодинамики этих процессов. В связи с этим для изучения классических высокотемпературных безгазовых процессов СВС был разработан специальный метод электротеплового взрыва [1]. Для изучения механизма низкотемпературных реакций применялись стандартные методы термического анализа. Так, исследование тепловыделения реакции титана с органическими веществами проводилось методом калориметрии [2]. Однако, проведение реакции при атмосферном давлении не обеспечило полноту протекания реакции, что показало ограниченность этого метода. Изучение механизма азотирования ферросилиция в режиме горения изучали в условиях динамического нагрева до температуры 1100 °С на ДТА/ТГ анализаторе [3]. Для исследования СВС процессов с участием водорода, протекающих при температуре 600 °С, применялись методы ДСК [4] и ТГА [5]. Для изучения горения смесей нитратов и нитритов щелочных и щелочноземельных металлов с углем использовали дериватограф МОМ при нагревании образцов до 900 °С [6]

### Объект исследования и методика эксперимента

Детонационные наноалмазы реакционноспособны – вступают в реакции окисления, замещения, присоединения, карбидообразования [7]. Однако, на настоящее время не описаны