

УДК 534.222.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ВО ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВАХ С ПОМОЩЬЮ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2013 г. К. А. Тен<sup>1</sup>, Э. Р. Прууэл<sup>1</sup>, А. О. Кашкаров<sup>1</sup>, Л. А. Лукьянчиков<sup>1</sup>, Л. А. Мержиевский<sup>1</sup>,  
Ю. А. Аминов<sup>2</sup>, Е. Б. Смирнов<sup>2</sup>, А. К. Музыря<sup>2</sup>, О. В. Костицын<sup>2</sup>

*E-mail: kashkarov@hydro.nsc.ru*

Приведены результаты исследования вызванных ударом переходных процессов в пористом ТАТБ, полученные с помощью разработанного и апробированного метода, основанного на использовании мягкой рентгеновской компоненты синхротронного излучения. Метод позволяет в одном эксперименте определять параметры ударника, распределение скорости и плотности за фронтом ударной и детонационной волны, параметры течения после отражения ударной волны от жесткой стенки. В экспериментах с зарядами плотностью 1.8 и 1.9 г · см<sup>-3</sup> в зависимости от условий нагружения получены следующие режимы процесса: отсутствие детонации, инициирование детонации в прямой и отраженной ударной волне.

DOI: 10.7868/S036767651302035X

### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованию ударно-волновых процессов во взрывчатых веществах (ВВ) обусловлен, в первую очередь, задачей определения критических условий инициирования детонации. С другой стороны, получаемые в таких исследованиях данные могут быть использованы для построения ударных адиабат ВВ. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования распространения ударных волн в образцах триаминотринитробензола (ТАТБ) при двух начальных плотностях  $\rho_0 = 1.8$  и  $1.9 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ , выполненного с помощью ранее разработанного и апробированного метода, основанного на использовании мягкой рентгеновской компоненты синхротронного излучения (СИ) [1, 2]. По сравнению с аналогичными традиционными невозможными методами, в которых излучение генерируется с помощью рентгеновских трубок, СИ обладает рядом преимуществ: высокую интенсивность потока фотонов  $\approx 10^6 \text{ фотон} \cdot \text{мм}^{-2}$  за одну экспозицию, малую угловую расходимость, высокую стабильность и периодичность вспышек излучения (время экспозиции  $\approx 1 \text{ нс}$ , период повторения – до 125 нс). На созданном стенде формируется зондирующий пучок СИ шириной 20 мм и толщиной 0.1 мм. Детальное описание методики восстановления физических парамет-

ров по получаемым экспериментальным данным приведено в [1–3]. Пространственное и временное разрешение метода позволяет регистрировать последовательные стадии развития процесса, включающие распространение ударной волны, возбуждение или отсутствие детонации.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились с цилиндрическими зарядами из прессованного ТАТБ диаметром 20 мм и длиной 15 мм с плотностью  $\rho_0 = 1.8$  и  $1.9 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ . Укажем, что таким образом ограничивалось расстояние, на котором могла возникнуть детонация. Ударная волна в образцах возбуждалась ударом алюминиевых и медных пластин толщиной 2 мм, метаемых с помощью взрывного устройства [1] со скоростями 200–2000 м · с<sup>-1</sup>. Тыльный торец заряда граничил с массивной стальной плитой, обеспечивающей отражение ударной волны. Сборка ориентировалась относительно луча СИ так, чтобы он проходил через ось заряда [3]. Это позволяет получить информацию о распределении плотности в наблюдаемом объекте. Так как в область наблюдения попадает и ударник, в экспериментах контролируется его форма, положение (отсутствие вращения) и определяется скорость удара. Полученные данные показывают, что происходит плоское соударение. Отслеживание динамики изменения плотности с частотой 0.5 мкс дает возможность проследить эволюцию профиля прямой и отраженной волн в

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск.

<sup>2</sup> Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск.

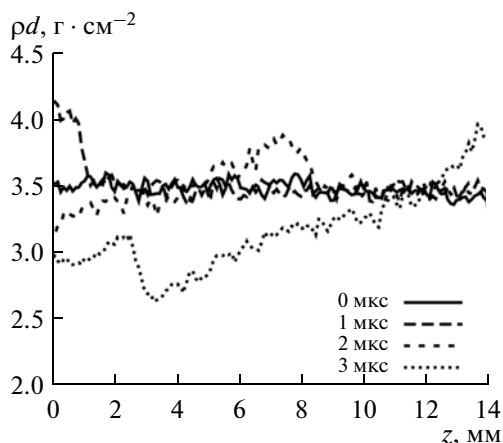


Рис. 1. Эволюция распределение массы на луче. Случай возбуждения детонации при прохождении ударной волны по заряду.

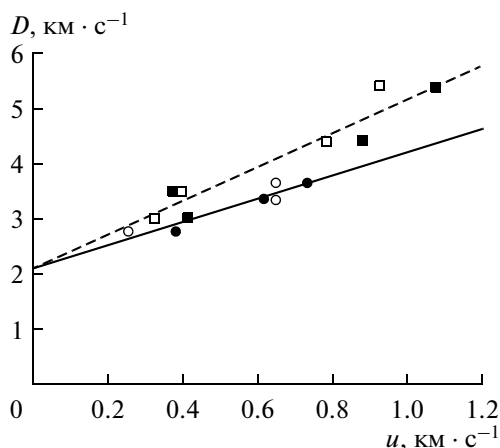


Рис. 2. Ударные адиабаты исследованных композиций.

заряде, скорость ее распространения, установить время и место возникновения детонации.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходным результатом измерений является распределение массы на луче, пересчитываемое по методике [3] в распределение плотности. На рис. 1 показаны экспериментальные данные для случая нагружения, при котором произошел переход прямой ударной волны в детонационную. Колебания сигнала в нулевой (до начала нагружения) момент времени вызваны как естественным разбросом показаний детектора (“шум”), так и возможной неоднородностью плотности по длине заряда. На кривых, соответствующих 1 и 2 мкс от начала процесса, четко выделяются скачки, соответствующие распространению волны. Ее скорость на этом и последующих промежутках времени — около  $7 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ . Кривая на момент 3 мкс свидетельствует о падении плотности за фронтом волны, что соответствует сформировавшемуся детонационному процессу.

В ряде проведенных экспериментов реализовались режимы, в которых не происходило инициирование ВВ или осуществлялось инициирование в волне, отразившейся от расположенной за зарядом преграды. Результаты суммируются в таблице, где приведены значения начальной скорости ударной волны, массовой скорости в образце и результат воздействия на заряд. Массовая скорость за фронтом волны определялась двумя способами: по скорости движения ударника и из закона сохранения массы на фронте при измеренных в опытах плотности и скорости ударной волны. Оценка критического давления инициирования для данного ВВ дает значение  $\sim 10 \text{ ГПа}$ .

Построенные по полученным данным ударные адиабаты в  $(D-u)$  (скорость ударной волны — массовая скорость) координатах приведены на рис. 2. Здесь кружки и сплошная линия относятся к плотности  $\rho_0 = 1.8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ , квадраты и пунктирная линия —  $\rho_0 = 1.9 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ , светлые значки соответствуют значению массовой скорости, определенной по скорости ударника, темные — из закона сохранения. Оба способа определения массовой скорости дают близкие результаты, что является дополнительным подтверждением корректности полученных величин. Данные для каждой плотности аппроксимируются традиционными линейными зависимостями. В диапазоне  $0.2 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \leq u \leq 0.8 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$  они имеют вид

$$D = 2.12 + 2.09u, \quad (\rho_0 = 1.8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}),$$

$$D = 2.09 + 3.08u, \quad (\rho_0 = 1.9 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}).$$

Различие в наклонах ударных адиабат объясняется отличием условий прессования зарядов, фор-

#### Результаты экспериментов

Плотность, $\text{г} \cdot \text{см}^3$	$u$ , км/с	$D$ , км/с	Результат опыта
1.8	0.26	2.77	Отсутствие детонации
1.8	0.65	3.36	Отсутствие детонации
1.8	0.65	3.67	Возбуждение детонации в отраженной волне
1.8	0.95	5.13	Возбуждение детонации в ударной волне
1.9	0.32	3.03	Отсутствие детонации
1.9	0.40	3.50	Отсутствие детонации
1.9	0.79	4.43	Отсутствие детонации
1.9	0.93	5.40	Возбуждение детонации в отраженной волне

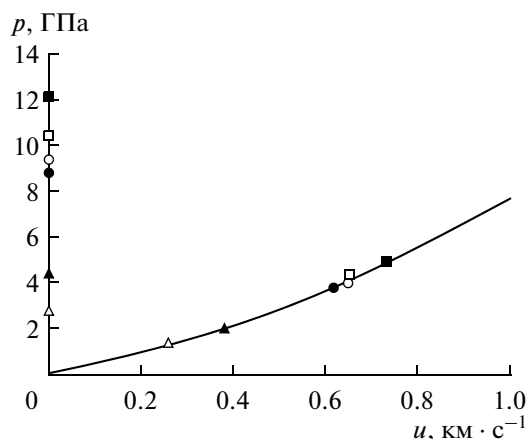


Рис. 3. Ударная адиабата ВВ при  $\rho_0 = 1.8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  в  $(p-u)$ -координатах.

мирующихся при этом структур и связующих добавок. Ввиду существенного влияния названных факторов на свойства и чувствительность ВВ достаточно сложно сравнивать эти и другие полученные нами данные с опубликованными результатами других исследователей [4, 5].

На рис. 3 приведена ударная адиабата для ВВ с  $\rho_0 = 1.8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  в  $(p-u)$ -координатах ( $p$  — давление). Здесь одинаковыми значками обозначены данные одного эксперимента, светлые и темные значки имеют тот же смысл, что и на рис. 2. Точки на оси ординат показывают определенное в опытах давление торможения при отражении волны от жесткой поверхности. Эти точки принадлежат различным ударным адиабатам вторичного сжатия.

Оценим погрешность проведенных измерений. Погрешность измерений массы вещества на луче, связанная с разбросом показаний детектора, определяется на основе кривых для нулевого момента времени (соответствующая кривая на рис. 1) и составляют единицы процентов. Скорость фронта волны регистрируется по переме-

щению на уровне полувысоты скачка, которое определяются с погрешностью до 0.2 мм (размер стрипа детектора) и усредняются по временным интервалам 500 нс. В той части заряда, где не происходит инициирование взрывного процесса, скорость ударного фронта практически постоянна. С учетом того, что за один интервал между экспозициями фронт проходит 1.5–2.0 мм, погрешность определения скорости составляет ~10%. При определении массовой скорости тем и другим способами возникает систематическая погрешность. Из сравнения двух независимых измерений можно оценить погрешность определения массовой скорости также на уровне 10%.

Таким образом, в результате проведенных исследований показана применимость метода, основанного на использовании синхротронного излучения, для получения новых физических результатов о поведении взрывчатых веществ при ударно-волновом нагружении. Определены ударные адиабаты двух взрывчатых композиций на основе ТАТБ и установлены условия инициирования детонации в конкретных случаях.

Работа выполнена при использовании оборудования ЦКП СЦСТИ и финансовой поддержке Минобрнауки России, грантов РФФИ № 12-01-00177-а, 11-03-00874-а и Интеграционного проекта СО РАН № 65.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Титов В.М., Прууэл Э.Р., Тен К.А. и др. // Физика горения и взрыва. 2011. № 6. С. 3.
2. Prueel E.R., Ten K.A., Titov V.M. et al. // Proc. 14th Int. Detonation Symp. 2010. P. 345.
3. Прууэл Э.Р., Мерзиевский Л.А., Тен К.А. и др. // Физика горения и взрыва. 2007. № 3. С. 121.
4. Шорохов Е.В., Литвинов Б.В. // Хим. физика. 1993. Т. 12. № 5. С. 722.
5. Джексон Р., Грин Л., Барлет Р. и др. // Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир, 1981. С. 323.

Сдано в набор 29.10.2012 г.  
Цифровая печать Усл. печ. л. 20.0

Подписано к печати 17.01.2013 г.  
Усл. кр.-отт. 3.1 тыс.  
Тираж 155 экз. Зак. 943

Формат  $60 \times 88^{1/8}$   
Бум. л. 10.0

Учредители: Российская академия наук,  
Институт прикладной физики РАН

Издатель: Российская академия наук. Издательство "Наука", 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90  
Оригинал-макет подготовлен МАИК "Наука/Интерпериодика"  
Отпечатано в ППП "Типография "Наука", 121099 Москва, Шубинский пер., 6