

различных экспериментов к нулевой точке отсчета не хуже 20 нс. Сдвиг по фазе между кривыми 1, 2 при одном и том же уровне относительной интенсивности везде заметно превышает эту величину.

**Выводы.** Проведенные эксперименты показывают:

а) Частицы наноалмаза вполне надежно фиксируются методом МУРР и при плотности окружающей среды, равной максимальной плотности ВВ ( $\approx 2 \text{ г/см}^3$ ).

б) Сигнал, фиксирующий рост частиц из смеси TNT/RDX 50/50, заметно отстает на начальной стадии по фазе от сигнала МУРР для случая заранее введенных частиц наноалмаза (т.е., при «времени роста»  $\tau = 0$ ). То есть, конденсация наночастиц углерода в наноалмаз при детонации TNT/RDX 50/50 начинается за зоной химической реакции.

в) Введенные в ВВ наноалмазы разрушаются в течении длительного времени (микросекунды).

1. Detonation Nanodiamonds and Related Materials. St. Petersburg: Ioffe Physico-Technical Institute, 2003.
2. Shaw M.S., Jonson J.D. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. № 5. P. 2080.
3. Титов В. М., Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю. ФГВ. 1989. Т. 25, № 3. С. 117.
4. Ершов А. П., Куперштох А. Л., Коломийчук В. Н. Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 3. С. 42.
5. Viicelli J. A., Ree F. H. J. Appl. Phys. 1999. V. 86. № 1. P. 237.
6. Алешаев А. Н., Зубков П. И., Кулипанов Г. Н. и др. ФГВ. 2001. Т. 37. № 5. С. 104.
7. Ершов А. П. Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 19. С. 90.
8. Titov V.M., Tolochko V.P., Ten K.A., et al. // Synthesis, Properties and Applications of Ultrananocrystalline Diamond. / Eds. Gruen D.M. et al. Netherlands: Springer, 2005. P. 169.
9. Viicelli J. A., Ree F. H. J. Appl. Phys. 2000. V. 88. № 2. P. 683.
10. Даниленко В. В. ФГВ. 2005. Т. 41. № 4. С. 110.
11. Лобойко Б. Г., Любятинский С. Н. ФГВ. 2000. Т. 36. № 6. С. 45.

## ОБ ИЗМЕРЕНИИ КРИВИЗНЫ ФРОНТА ДЕТОНАЦИИ ДЛЯ УЧЕТА ПРИ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗЛЕТАЮЩИХСЯ ПРОДУКТОВ

Прууэл Э. Р.<sup>1</sup>, Мерзиевский Л. А.\*<sup>1</sup>, Лукьянчиков Л. А.<sup>1</sup>, Тен К. А.<sup>1</sup>, Вагин М. С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИГиЛ СО РАН, <sup>2</sup>НГУ, Новосибирск

\*merzh@hydro.nsc.ru

Задача о разлете продуктов детонации рассматривалась неоднократно [1–3], но продолжает вызывать интерес. Это связано с тем, что такие данные дают информацию об энтропиях продуктов, которые необходимы при построении уравнений состояния. Результаты исследования разлета с помощью СИ изложены в [4]. Важным моментом в интерпретации получаемых данных является учет кривизны фронта детонации, особенно в случае зарядов малого диаметра.

В классических моделях детонации (Чепмена-Жуге, Зельдовича-Неймана-Дёринга, их обобщениях) предполагается, что фронт детонационной волны, состоящей из ударной волны и зоны химической реакции, является плоским. С использованием этого предположения вычисляются параметры Чепмена-Жуге и, зачастую, рассчитывается дальнейший разлет продуктов. Вместе с тем, давно известно, что реально фронт детонации не является плоским, и кривизна фронта меняется с ростом диаметра заряда, достигая своего стационарного значения при превышении предельного диаметра [5]. Таким образом, определение кривизны фронта детонации необходимо как для интерпретации результатов экспериментов по исследованию процесса разлета, так и при определении параметров детонации.

Известно несколько способов измерения кривизны фронта, в том числе — с помощью рентгеновской съемки в перпендикулярном к направлению детонации направлении, скоростной фотосъемки выхода детонационной волны на то-

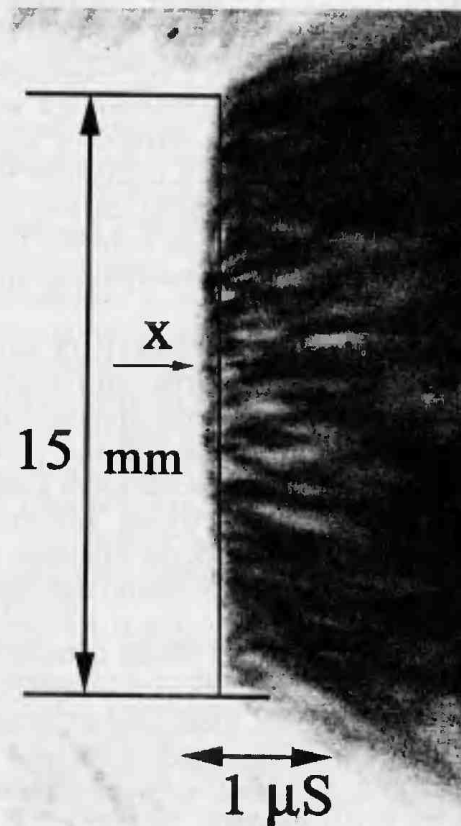


Рис. 1.

рец заряда, с помощью контактных датчиков. В данной работе были реализованы два последних метода.

Пример фоторегистрограммы выхода детонационной волны на торец заряда из прессованно-

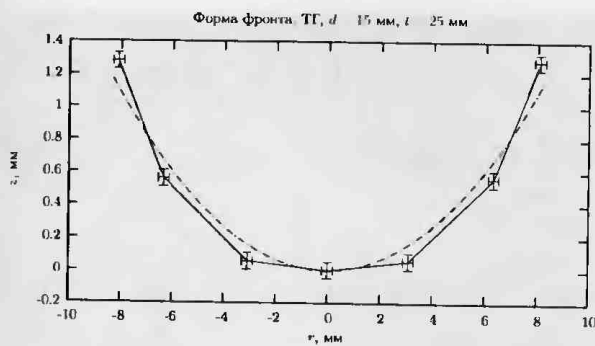


Рис. 2.

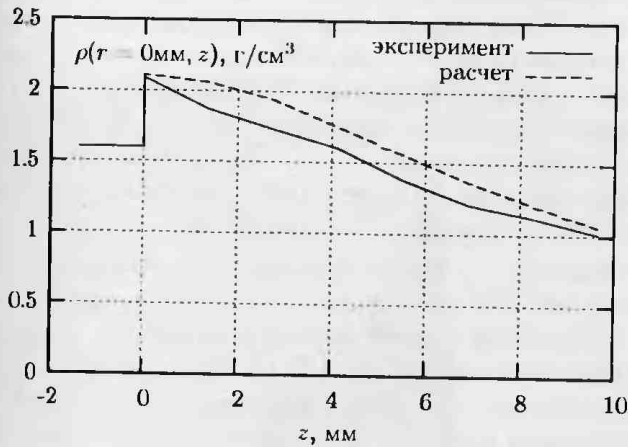


Рис. 3.

	ТНТ	Гекс	ТГ 50/50	ТГ 50/50	ТГ 50/50
Диаметр заряда, мм	15	15	7	12.5	15
Метод измерений	СФР	СФР	СФР	СФР	контактный
Скорость детонации, км/с	6,95	8,3	7,55	7,65	7,65
Радиус кривизны в диаметрах	2,1d	2,35d	1,9 d	2,04d	1,6d

го тротила диаметром 15 мм и длиной, достаточной для установления стационарного режима, показан на рис. 1 (заряд прессованного тротила). Предполагая, что фронт детонации имеет полусферическую форму, несложно рассчитать радиус кривизны.

Во втором случае использовались контактные датчики, расположенные на торце цилиндрического заряда на оси и фиксированных расстояниях от центра, замыкавшиеся в момент прихода фронта детонационной волны. Возникающий при этом электрический сигнал подавался на вход осциллографа, что давало временные метки, позволяющие определить разность времени прихода фронта детонации в разные точки плоскости и определить форму фронта. Пример измеренной таким образом формы фронта показан на рис. 2 (заряд ТГ 50/50, заряд длиной 25 мм, детонация

не вышла на стационарный режим).

Несмотря на простоту метода, использующего датчики, замыкающиеся во фронте детонационной волны, обеспечивает вполне удовлетворительную точность измерения.

Полученные с помощью описанных методов значения радиуса кривизны фронта и измеренные независимыми методами скорости детонации приведены в таблице.

Найденные значения кривизны фронта использовались затем при обработке данных о распределении плотности разлетающихся продуктов детонации и структуре детонационной волны, получаемых с помощью синхротронной диагностики [4].

Значительную роль кривизны фронта детонации на распределение параметров продуктов детонации показали соответствующие расчеты. Решалась газодинамическая задача о разлете продуктов стационарной детонации, детальная постановка которой изложена в [4]. При этом результаты расчетов с плоским (рис. 3) и искривленным (рис. 4) фронтом сравнивались с экспериментальными данными. Как следует из рисунков, учет кривизны фронта детонации приводит к существенно более точному соответствию результатов расчетов и экспериментов.

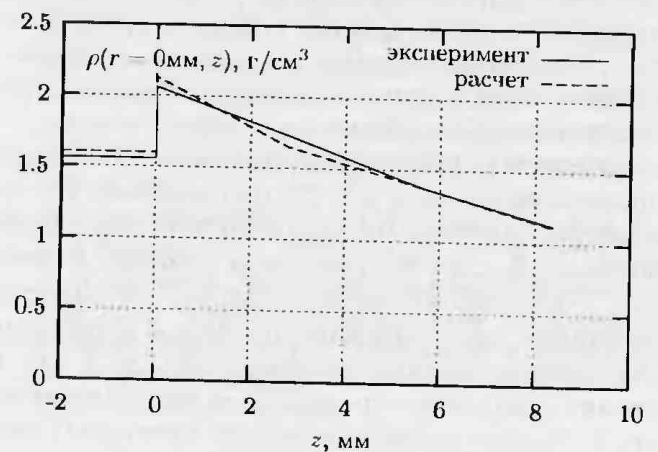


Рис. 4.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-02-17335, интеграционного проекта СО РАН № 23, и молодежного гранта СО РАН № 18.

1. Зельдович Я.Б., Компанец А.С. Теория детонации. М., ГИТТЛ, 1955.
2. Дремин А.Н., Савров С.Д., Трофимов В.С., Шведов К.К. Детонационные волны в конденсированных средах. М, Наука, 1970, 172 с.
3. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. Изд. 2. М., Наука, 1975.
4. Э.Р. Прууэл, Л.А. Мержиевский, К.А. Тен, П.Н. Зубков, Л.А. Лукьяничков, Б.П. Толочко, А.Н. Козырев, В.В. Литвенко. Распределение плотности разлетающихся продуктов стационарной детонации тротила. ФГВ, 2007, № 3.
5. М.А. Cook. The science of high explosives. 1958, New York, 440 p.

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ  
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ХИМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ  
КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

---



ФИЗИКА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ  
ВЕЩЕСТВА — 2007

Черноголовка — 2007

**Физика экстремальных состояний вещества — 2007**

*Под редакцией Фортова В. Е., Ефремова В. П., Хищенко К. В., Султанова В. Г., Левашова П. Р., Темрокова А. И., Карамурзова Б. С., Канеля Г. И., Минцева В. Б., Савинцева А. П.*

Сборник посвящен исследованиям в области физики высоких плотностей энергии и теплофизики экстремальных состояний. Рассматриваются процессы взаимодействия мощных ионных и электронных пучков, интенсивного лазерного, рентгеновского и СВЧ излучения с веществом, электрический взрыв проводников мощными импульсами тока, методы генерации интенсивных импульсных потоков энергии, экспериментальные методы диагностики быстропротекающих процессов, физика ударных и детонационных волн, различные модели и результаты теоретических расчетов уравнения состояния вещества в экстремальных условиях при высоких давлениях и температурах, физика низкотемпературной плазмы, проблемы управляемого термоядерного синтеза и традиционной энергетики, а также различные технологические аспекты. Основная часть работ была представлена на XXII Международной конференции «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество» (Эльбрус, 1–6 марта 2007 г.). Издание адресовано специалистам в области физико-технических проблем энергетики.