

ке 1024×256 ячеек. На рис. 3 показано распределение плотности в различные моменты времени. Прямоугольниками обозначены границы сеток 1-го и 2-го уровней измельчения. Видно, что сетки эволюционируют по мере интегрирования уравнений газодинамики, причём мелкие сетки концентрируются вблизи ударных волн и больших градиентов параметров.

Также был сделан расчёт той же задачи на равномерной эквивалентной сетке, то есть на сетке, пространственное разрешение которой было одинаково во всей области задачи, не менялось во времени и соответствовало разрешению мельчайшего уровня при расчёте с AMR. На рис. 4 изображён график, отражающий скорость счёта, для двух описанных случаев. Таким образом, в данной задаче при выбранном времени счёта при помощи AMR удалось достичь ускорения счёта в 4 раза. Таблица 2 показывает выигрыш AMR по

таким параметрам как максимальный задействованный при счёте объём оперативной памяти и объём памяти, необходимый для хранения данных в определённый момент времени.

Таким образом, в данной работе показана эффективность применения алгоритма адаптивного измельчения сеток для двух типов задач с сильно неоднородным и/или разрывным распределением параметров.

1. Berger M., Olinger J. // J. Comput. Phys. 1984. V. 5. P. 484.
2. Colella P., Graves D. T., et al. Chombo Software Package for AMR Applications Design Document Applied Numerical Algorithms Group, NERSC Division, and Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA. September 12, 2003.
3. Федоренко Р. П. // ЖВМиМФ. 1961. Т. 1 № 5. С. 922.

ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИКИ МАЛО-УГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ У ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ДОБАВКАМИ НАНОАЛМАЗОВ

Тен К. А.*¹, Титов В. М.¹, Толочко Б. П.², Жогин И. Л.², Лукьянчиков Л. А.¹

¹ИГиЛ СО РАН, ²ИХТТМ СО РАН, Новосибирск

*ten@hydro.nsc.ru

Абстракт. В режиме *in situ* экспериментально исследовалось образование наноалмазов во время детонации состава TNT/RDX 50/50 методом мало-углового рентгеновского рассеяния с использованием синхротронного излучения ускорителя ВЭПП-3. Применена новая экспериментальная постановка с введенными во взрывчатое вещество наноалмазами. Показано, что наноалмазы начинают расти за зоной химической реакции.

Введение. Хотя синтезу наноалмазов при взрыве посвящено весьма большое число работ [1] вопрос об образовании их, а также более общий вопрос о конденсации углерода при детонации ВВ с отрицательным кислородным балансом, остаётся дискуссионным до настоящего времени. Ответ на него важен как для понимания физики явления, так и для оценки количества энергии, которая выделяется при экзотермической коагуляции углеродных кластеров.

Одна из первых работ в этой области, выполненная как раз с точки зрения такого энергетического подхода, была опубликована в 1987 г [2]. В ней расчётным путём была показана возможность суммарной добавки примерно в 10% к той энергии, которая выделяется при собственно детонационном процессе.

В 1988 г. были опубликованы первые результаты об образовании при взрыве детонационных наноалмазов. В работе [3] было высказано предположение, что процесс синтеза определяется в основном, зоной химической реакции. Это утверждение базировалось на неизменности распределения частиц наноалмазов по размерам (в очищенных сохранных продуктах взрыва) при

разных масштабах увеличения размеров зарядов. Очевидно, что при этом неизменными остаются только процессы в зоне химической реакции. Соответственно, и время синтеза было оценено в несколько десятых микросекунды (не более 0,1 мкс) [3]. Чтобы согласовать расчётные и экспериментальные данные, в [4] авторы ввели в модель [2] априорное ограничение на рост размера частиц. При этом время роста хорошо согласуется с предложенной в [3] оценкой времени синтеза.

Опубликованные в 1999 г результаты по сравнению расчётных и экспериментальных данных по ускорению очень тонких металлических пластинок продуктами детонации (ПД) ВВ с отрицательным кислородным балансом показали, что такой процесс точнее описывается в предположении о наличии конденсации углерода за зоной химической реакции, или, как принято в теории детонации — за плоскостью Чапмена — Жуге, которая отделяет зону реакции от газодинамического течения ПД [5].

В первых же экспериментах по применению синхротронного излучения (СИ) для диагностики детонационных процессов был установлен факт относительно медленного роста сигнала при малоугловом рассеянии СИ (SAXS) — в течении 1,5 мкс при диаметре зарядов 10–15 мм [6]. На этом основании было предложено, что образование частиц углерода (в том числе и наноалмазов) происходит за пределами зоны химической реакции (в данном случае протяжённость ее порядка 0,7 мм). Этот вывод вызвал ряд критических замечаний [7], которые сводятся к следующему. В методе SAXS интенсивность рассеянного сигнала в первом приближении пропорциональна квадрату

ту разности плотностей рассеивающей частицы и окружающей среды (продуктов детонации – ПД). При плотности ПД в начальный момент порядка 2 г/см^3 сигнал может быть не заметен для детектора, и только при разлете ПД, т.е. уменьшении плотности, станет регистрируемым. Этим же может объясняться и тенденция к увеличению зоны запаздывания максимума сигнала с ростом диаметра заряда [8], так как разлет ПД займет в этом случае большее время.

Следует упомянуть также о работах [9, 10], в которых авторы определяют возможное место синтеза напоялмазов на ($P-T$)-диаграмме углерода с учетом размера наночастиц.

Изложенные результаты малой доли работ по синтезу напоялмазов показывают наличие различных точек зрения на процесс. Цель данной работы — экспериментальная регистрация начала появления напоялмазов при детонации зарядов из тротила и гексогена методом малоуглового рассеяния (МУРР) синхротронного излучения.

Введение взрывных (полученных при детонации ВВ) напоялмазов в заряды TNT и RDX позволяет моделировать случай «мгновенного» появления напоялмазов при детонации ВВ.

Постановка экспериментов по измерению МУРР приведена в работах [6, 8]. Использовалось синхротронное излучение из вигглера с полем 2 Т накопителя электронов ВЭПП-3 (ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН). Жесткость излучения около 20 кэВ, частота импульсов 4 МГц, длительность экспозиции 1 нс, пространственное разрешение детектора излучения 0,1 мм. Электронная схема детектора позволяет запоминать 32 кадра спектра рассеяния, сделанные через 500, 250 или 125 нс. В последнем случае на орбите накопителя ускоряются два сгустка электронов (банча), находящиеся в диаметрально противоположных точках орбиты.

Исследовались составы TNT/RDX 50/50, TNT + 8% UDD, RDX + 8% UDD (по массе). Все ВВ перед прессованием были перекристаллизованы, диаметр зарядов был равен 15 мм, длина ≈ 80 мм. Иницирование осуществлялось генератором плоской волны. Первый состав является одним из основных при производстве напоялмазов; TNT даст при детонации существенно меньше напоялмазов, но большое количество углеродного остатка в виде графита; RDX — более мощное ВВ, имеет нулевой кислородный баланс, твердого остатка не даст. Добавка в 8% напоялмаза (производства НПО Алтай) при прессовке примерно соответствует тому количеству, которое возникает при взрыве TNT/RDX 50/50.

Результаты представлены на рис. 1. Нулевая точка по времени — момент прихода детонационной волны на плоскость пучка СИ. Уменьшение сигнала в этот момент на кривых 1, 3 соответствует возрастанию плотности ВВ на фронте детонационной волны.

Для более мощного RDX значительная часть

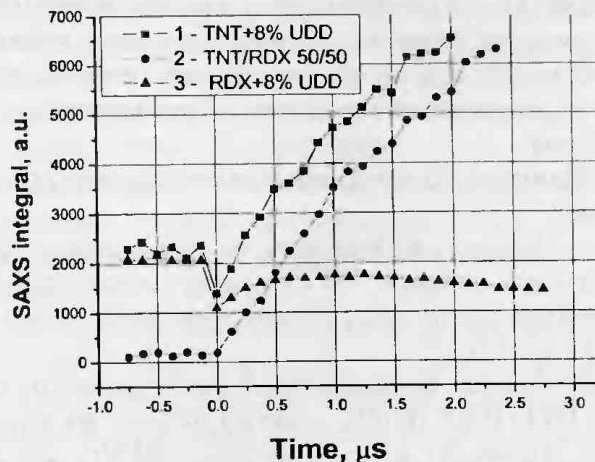


Рис. 1. Зависимость интегрального МУРР от времени при детонации зарядов из TNT и RDX с добавками ультра дисперсных алмазов.

напоялмазов при этом разрушается, и происходит спадание величины сигнала. Для TNT величина сигнала восстанавливается и продолжается ее рост — за счет образования конденсированного углерода при взрыве ВВ, а также вследствие разлета продуктов детонации («эффект контрастности»). Начальный уровень сигнала у тротила и гексогена (кривые 1 и 3) соответствует введенным 8% напоялмазов.

В момент прохождения фронта детонации (нулевой момент по времени на графике) сигнал МУРР у них уменьшается пропорционально изменению «контрастности». Для гексогена уменьшение сигнала должно быть равно $(\rho_A - \rho_0)^2 / (\rho_A - \rho_1)^2 = 1.89$, где $\rho_A = 3.5 \text{ г/см}^3$ — плотность напоялмазов, $\rho_0 = 1.71 \text{ г/см}^3$ — начальная плотность гексогена, и $\rho_1 = 2.2 \text{ г/см}^3$ — его максимальная плотность. Для тротила уменьшение сигнала равно $(\rho_A - \rho_0)^2 / (\rho_A - \rho_1)^2 = 1.6$, где $\rho_0 = 1.69 \text{ г/см}^3$ и $\rho_1 = 2.08 \text{ г/см}^3$ — соответствующие плотности для тротила.

Отметим четкую фиксацию введенных напоялмазов на фоне сжатого вещества во фронте детонации. Здесь же приведена кривая 2 для смеси TNT/RDX 50/50. Сигнал начинается с нулевой отметки и плавно растет, практически повторяя форму кривой 1, но с регистрируемым сдвигом по времени по отношению к ней. При образовании напоялмазов в зоне химической реакции ($\tau \approx 0.1$ мкс [11]) кривая 2 должна была бы иметь такой же скачок, как на кривых 1, 3. Отсутствие скачка означает отсутствие значительного количества напоялмазов в этой зоне. Кривая МУРР при детонации гексогена с напоялмазами идет гораздо ниже, чем у тротила, несмотря на то, что разлет продуктов детонации у них примерно одинаков. Такое поведение МУРР означает разрушение напоялмазов в разлетающихся продуктах детонации гексогена. Причем «сгорание» происходит за зоной химической реакции. Благодаря специально принятым мерам, точность привязки данных

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., Кулипапов 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.¹, Мерзиевский Л. А.*¹, Лукьянчиков Л. А.¹, Тен К. А.¹, Вагин М. С.²

¹ИГиЛ СО РАН, ²НГУ, 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-

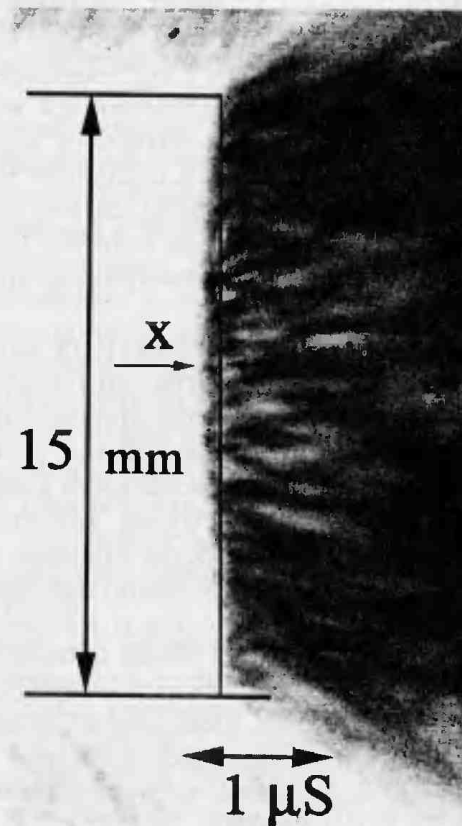


Рис. 1.

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

Пример фоторегистрограммы выхода детонационной волны на торец заряда из прессованно-

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.