

СИНХРОТРОННАЯ ДИАГНОСТИКА ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ

Титов В.М., Тен К.А., Прууэл Э.Р., Толочко Б.П.¹

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, Россия

¹Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

За последние годы в печати появился ряд работ, целью которых является диагностика динамических (в т.ч. взрывных) процессов с помощью синхротронного излучения (СИ), возникающего при работе мощных циклических ускорителей электронов. Неполный список этих работ, выполненных сотрудниками Сибирского отделения РАН на базе ускорителя ВЭПП-3 Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, приведен в списке литературы [1-12].

В них использовалось синхротронное излучение с энергией фотонов 20-30 кэВ от накопителя ВЭПП-3. В режиме, когда электроны на орбите накопителя собраны в один сгусток (банч), длительность возникающего рентгеновского излучения составляет 1 нс, периодичность 250 нс (или кратная этой величине), общий поток – 10^{16} фот/сек. Пучок практически является плоскопараллельным. Для регистрации использовался специально разработанный в ИЯФ детектор DIMEX с угловым разрешением 10^{-4} рад, имеющий 512 каналов приема при поперечном размере канала 0.1 мм. Электронная схема детектора позволяет запомнить 32 кадра, время запоминания меньше интервала между импульсами СИ.

В настоящее время использование СИ для диагностики взрывных процессов осуществляется следующим образом:

1. Измерение проходящего излучения и получение данных по распределению плотности в детонационной волне вдоль оси цилиндрического заряда ВВ.

2. Измерение проходящего излучения и восстановление объемного распределения плотности в разлетающихся продуктах детонации ВВ. Созданы методы восстановления объемных распределений полей скорости и давления в продуктах детонации.

3. Измерение малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) и определение динамики роста рассеивающих частиц конденсированного углерода для ВВ с отрицательным кислородным балансом.

Ниже приведены некоторые результаты по указанным выше постановкам. В значительной мере они получены при исследовании детонационного процесса в триаминотринитробензоле (ТАТБ); для прессованных тротила и гексогена, а также для сплава ТГ 50/50, аналогичные данные изложены в [7, 8, 10-13].

Измерение проходящего излучения.

Рассмотрим первую из указанных постановок – измерение плотности вещества в детонационной волне конденсированного ВВ. Эта методика основывается на использовании тонкого пучка СИ, направляемого вдоль оси заряда ВВ (поперечник радиационного “ножа” – 0.2 мм при высоте 18 мм; калибр заряда 20 мм). Необходимым условием для расшифровки сигнала является точное измерение относительного поглощения интенсивности излучения в зависимости от массы вещества вдоль луча.

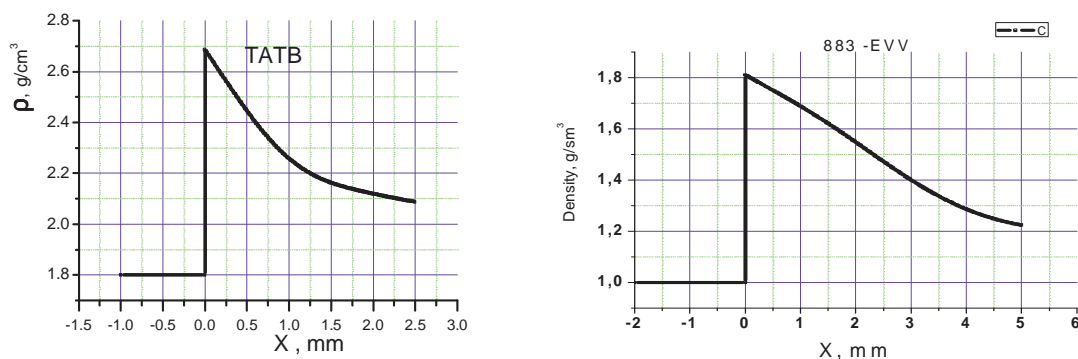


Рис. 1 – Профиль плотности на фронте детонации в ТАТБ (слева) и в ЭВВ (справа)

Наиболее ответственным моментом является фиксация с помощью фоторегистратора кривизны детонационного фронта в исследуемом сечении. Прецизионное сканирование полученного оптического изображения позволяет построить замкнутую систему алгебраических уравнений, в которой учитывается, какая часть детонирующего вещества попадает в диапазон соответствующего канала для регистрации СИ. Остальные процедуры стандартны и позволяют определить профиль $\rho(x)$. Графики измерения для ТАТБ и ВВ на его основе, а также для одного из типов эмульсионного ВВ на основе аммиачной селитры приведены на рис. 1 и в табл. 1. Начальные значения плотности исследованных ВВ: ТАТБ – 1.85 г/см³, ПСТ – 1.92 г/см³, ПТО – 1.89 г/см³, ЭВВ – 1.0 г/см³. Длина зарядов 30 мм.

Расстояние до плоскости Чепмена-Жуге (определялось по перегибу на распределении плотности) составило от 0,7 мм (у ТНТ) до 4 мм (у ЭВВ). Отношение плотностей в пике Неймана и Чепмена-Жуге меняется от 1,17 (у ПСТ) до 1,3 (у ЭВВ).

ВВ	ρ_N , г/см ³	ρ_{cj} , г/см ³	τ , мкс	Δ , мм	ρ_N / ρ_{cj}
ТАТБ	2,68	2,32	0,13±0,013	1,1±0,1	1,20
ПСТ	2,65	2,22	0,15±0,014	1,2±0,1	1,17
ПТО	2,7	2,2	0,14±0,015	1,1±0,2	1,23
ЭВВ	1,81	1,37	0,75±0,14	3,5±0,5	1,3
ТНТ	2,61	2,09	0,1±0,014	0,7±0,1	1,25

Таблица 1. Здесь ρ_N – плотность в максимуме пика Неймана, τ и Δ – его длительность и ширина, ρ_{cj} – плотность Чепмена – Жуге, В последнем столбце приведено отношение плотностей ρ_N / ρ_{cj} в пике Неймана и в плоскости Чепмена – Жуге.

Восстановления параметров течения

Во второй постановке, исследуемый цилиндрический заряд просвечивается перпендикулярно своей оси. По полученной рентгеновской тени, предполагая осевую симметричность течения восстанавливается внутреннее распределение плотности [7, 9, 15, 16].

Разработанные специализированные методы восстановления плотности, основанные на регуляризации искомого решения посредством интенсивного использования априорной информации о структуре исследуемого течения, позволили не только значительно улучшить точность восстановления плотности, но и начать восстанавливать другие механические параметры течения: распределения массовой скорости и давления [17–18].

На текущий момент наилучшие результаты по восстановлению распределения плотности дает метод, основанный на подборе параметров уравнения состояния продуктов взрыва дающем наилучшее соответствие рассчитанного течения и измеренной в эксперименте рентгеновской тени. Для этого с тестируемым уравнением состояния численно решается задача газодинамического течения детонации цилиндрического заряда. По вычисленной плотности восстанавливается динамика рентгеновской тени в исследованном сечении заряда. Затем, параметры уравнения состояния подбираются из условий наилучшего соответствия эксперименту.

Опишем алгоритм восстановления параметров течения более подробно. Для этого рассмотрим детонационную волну с плоским фронтом и распространяющуюся с постоянной скоростью D по цилиндрическому заряду конечной длины (рис. 2).

Запишем систему уравнений газовой динамики в цилиндрических координатах: закон сохранения потока массы и компонент импульса:

$$\frac{\partial r\rho u}{\partial r} + \frac{\partial r\rho v}{\partial z} = \frac{\partial r\rho}{\partial t}, \quad \frac{\partial r\rho u^2}{\partial r} + \frac{\partial r\rho uv}{\partial z} + r \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial r\rho u}{\partial t}, \quad \frac{\partial r\rho v^2}{\partial z} + \frac{\partial r\rho uv}{\partial r} + r \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial r\rho v}{\partial t}.$$

Дополним ее граничными условиями: на плоской поверхности детонационного фронта втекает

поток с известными параметрами: $\rho_0 D$ – поток массы, $\rho_0 D^2$ – поток осевой компоненты импульса. На всей остальной поверхности граничные условия соответствуют распаду разрыва в вещество с ударной адиабатой соответствующей воздуху. Здесь явно предполагается плоский детонационный фронт распространяющийся с постоянной скоростью D вдоль всего заряда. Скорость детонации измерялась в отдельных экспериментах.

В такой постановке, при известной зависимости давления от плотности, система уравнений может быть численно решена. В результате, будут известны распределения всех величин: $\rho(r, z, t)$, $\vec{v}(r, z, t)$ и $p(r, z, t)$.

Полная информация о плотности позволяет сравнить динамику рентгеновской тени, рассчитанную численно и измеренную в эксперименте и, таким образом, подобрать уравнение состояния, наиболее хорошо описывающее измеренную в эксперименте рентгеновскую тень.

Представим неизвестное уравнение состояния вещества за фронтом детонационной волны в параметрическом виде – $p(\rho) = p_0 (\rho / \rho_0)^{\gamma(\rho)}$, где $\gamma(\rho)$ – кубический сплайн, проведенный через фиксированные по плотности узлы – ρ_i . Значения показателя адиабаты γ_i в этих узлах являются неизвестными искомыми параметрами уравнения состояния.

Приведенная система многократно решалась численно методом Годунова на лагранжевой сетке (рис. 2). При каждой новой итерации параметры уравнения состояния улучшались, минимизируя сумму квадратов отклонений расчетной тени и измеренной в эксперименте.

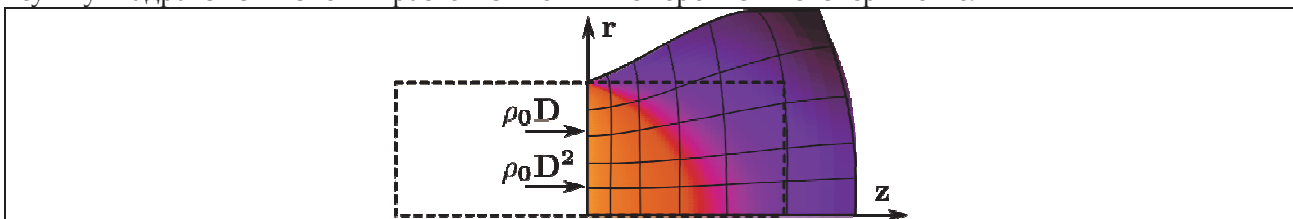
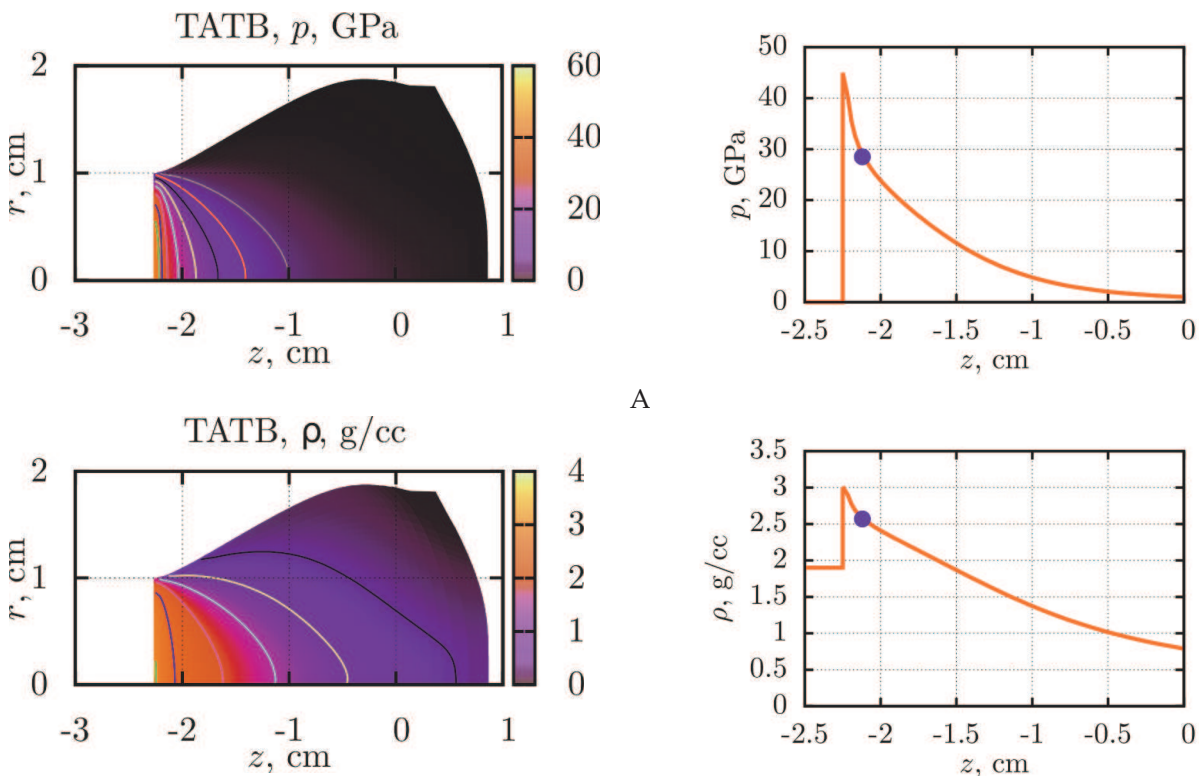


Рис. 2: Схема постановки газодинамической задачи по расчету детонационного течения и граничные условия. Пунктирной линией обозначены начальные границы заряда.



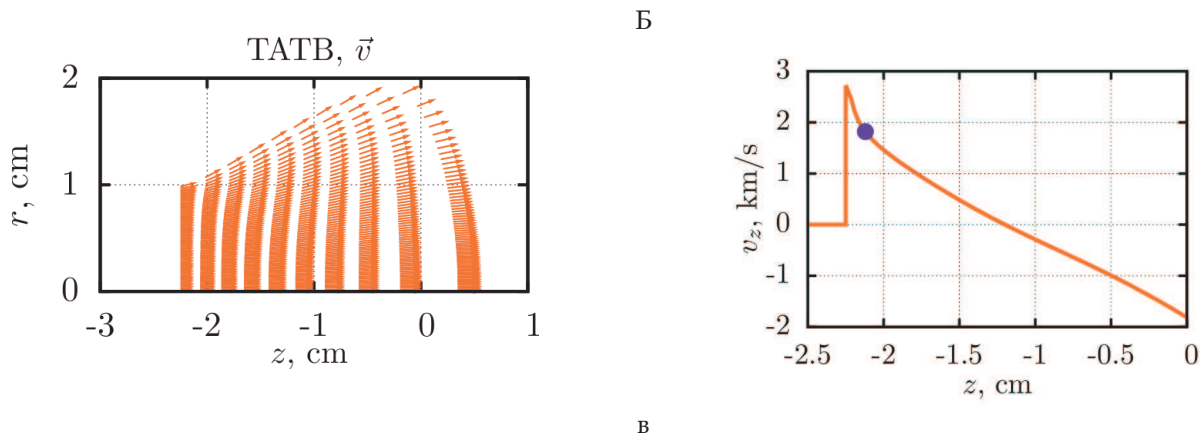


Рис. 3: Пространственные распределения параметров и значения их на оси, при детонации цилиндрического заряда на основе ТАТБ с исходной плотностью $1,85 \text{ г/см}^3$: а – давление, б – плотность, в – массовая скорость.

Полученное в результате параметрическое уравнение состояния позволяет восстановить все механические параметры для всего детонационного течения. На рис. 3 приведены полученные пространственные распределения давления, плотности и массовой скорости.

Временное разрешение метода позволяет уверенно измерять параметры детонационного течения за поверхностью Чепмена—Жуге. В области энерговыделения, метод дает только оценочные значения механических параметров течения.

Измерение малоуглового рентгеновского рассеяния

В методике использования мало-углового рентгеновского рассеяния (МУРР) регистрируется дифракционный сигнал от образца в области малых углов. Метод широко применяется при анализе структуры дисперсных систем. Амплитуда МУРР зависит от величины «флуктуации электронной плотности», которая в нашем случае связана с появлением конденсированных наночастиц углерода. Угловое распределение МУРР определяется размерами и структурой рассеивающей наночастицы [14].

Схема экспериментов подробно описана в [10, 12, 19]. Для регистрации МУРР использовался детектор DIMEX [18]. В проведенных экспериментах настройки схемы измерений дают возможность фиксировать рассеянное излучение от частиц размером от 2 до 70 нанометров.

Существующая на коллайдере ВЭПП-3 интенсивность пучка СИ оказывается недостаточной для использования монохроматора в измерениях МУРР, в связи с этим использовался пучок СИ с исходным полихроматическим спектром

Для оценки регистрируемого сигнала были проведены модельные расчеты для интенсивности МУРР на сферических частицах диаметром 2, 4, 10 и 20 нм расположенных в заряде ТНТ диаметром 20 мм. Расчет велся с учетом спектра ВЭПП-3 (энергия электронов $E = 2 \text{ ГэВ}$, вигглер с индукцией 2Т) и спектральной чувствительности детектора DIMEX. Расчеты показали, что по измеренному наклону кривых МУРР можно определять диаметр частиц в диапазоне от 2 до 100 нм.

Исследовались прессованные заряды ТГ50/50, ТАТБ и БТФ диаметром 20 мм и длиной 30 мм. Инициирование проводилось пластифицированным зарядом на основе ТЭНа. Заряды ТАТБ и БТФ поставлялись ВНИИТФ (г. Снежинск).

На рис. 4 показаны только по три кадра (графика) распределений МУРР при детонации ТГ50/50 и БТФ. Угол рассеяния 2θ приведен в каналах детектора (1 канал = 0,1 миллирадиан). На кадрах видна динамика МУРР, т.е. рост сигналов и изменение их угловых распределений. Амплитуды распределений МУРР у них заметно отличаются. Через время $\sim 2 \text{ мкс}$ амплитуда МУРР составляет 270 мВ (детектора DIMEX) у ТАТБ, 600 мВ у ТГ 50/50 и 4500 мВ у БТФ. При детонации БТФ основной угловой сигнал МУРР идет в малые углы (5-10 каналов детектора). У ТАТБ и БТФ были зарегистрированы заметные сигналы МУРР до взрыва (в исходном ВВ), практически исчезающие непосредственно на фронте детонации. Вероятно, начальный МУРР у ТАТБ и БТФ вызван наличием

в исходных ТАТБ и БТФ заметных межкристаллических пор, которые устраняются при сжатии ВВ под воздействием мощной ударной волны.

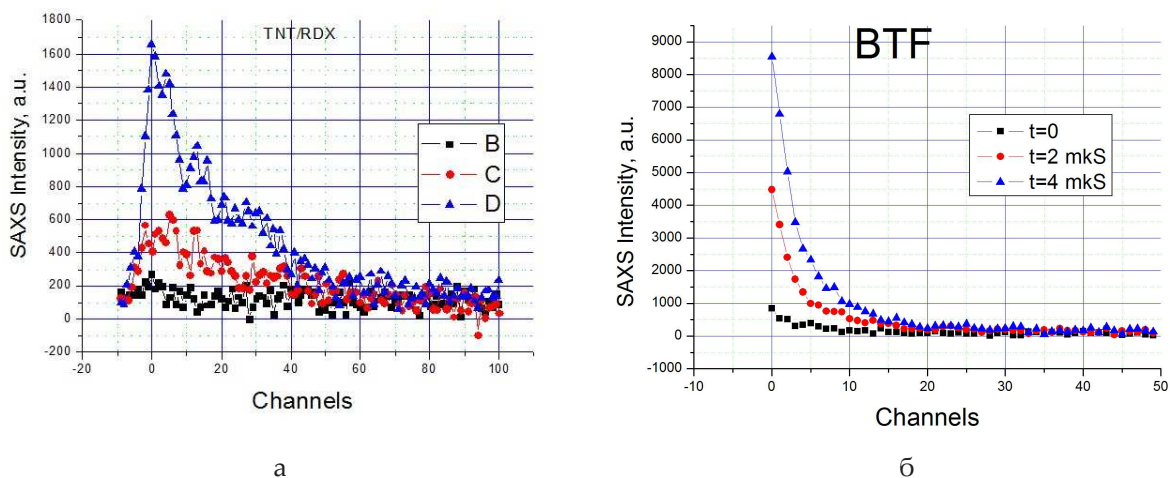


Рис. 4. а - зависимость углового распределения амплитуды МУРР от времени при детонации ТГ50/50 (а), и БТФ (б). Угол отложен в номерах каналов детектора ($\times 0,1$ мрад). Кадр В соответствует прохождению фронта детонации, С – через 2 мкс, D – через 4 мкс.

Кроме углового распределения МУРР представляет интерес полный поток рассеянного излучения по всем углам. Для этого интенсивность МУРР суммируется по всем каналам детектора (реально от 1 до 100) и интегрируется по углу вращения.

Поскольку измеряемый МУРР не монохроматичен, то полный (интегральный) сигнал МУРР получается еще суммированием по всем длинам волн излучения согласно спектру излучения ускорителя ВЭПП-3 и поглощению детектора DIMEX.

Если рассеивающая частица с плотностью ρ находится не в вакууме, а в среде с плотностью ρ_0 , то интенсивность полного рассеяния от шара пропорциональна:

$$I_0(q, R) \approx R^6 \cdot (\rho - \rho_0)^2$$

Здесь $q=2\pi/\lambda$, R – радиус частицы [14]. Квадрат разности плотностей $(\rho - \rho_0)^2$ часто называют «контрастностью».

Амплитуда интегрального МУРР сильно зависит от контрастности, то есть от разности плотности конденсированной частицы и плотности продуктов взрыва. Более плотные нанодиазмы (плотность $3,5 \text{ г/см}^3$) дают в 4 раза больший сигнал МУРР, чем от графита (плотность $2,2 \text{ г/см}^3$) при плотности продуктов детонации равной $1,0 \text{ г/см}^3$. Таким образом, по величине интегрального МУРР можно оценить фазовый состав рассеиваемых наночастиц.

На рис. 5, а приведены зависимости интегрального МУРР от времени. В момент прохождения фронта детонации сигнал минимален, затем наблюдается заметный рост. Наибольший сигнал интегрального МУРР у БТФ. Причем реальное значение интегрального МУРР, по-видимому, больше, так как основной сигнал идет в малые углы, которые при настройке обрезаются. У зарядов из ТАТБ он на порядок меньше. Это означает, что рассеивающие частицы имеют заметно меньший размер и меньшую плотность и, скорее всего, являются графитоподобными.

Обработка динамики распределений МУРР осуществлялась по формуле Гинье [14] с учетом спектра ВЭПП-3 и параметров детектора DIMEX. Более подробно алгоритм восстановления размеров рассеивающих частиц описан в [19]. Процедура такой обработки позволяет получить эволюцию размеров частиц с момента прохождения фронта детонации (рис. 5, б).

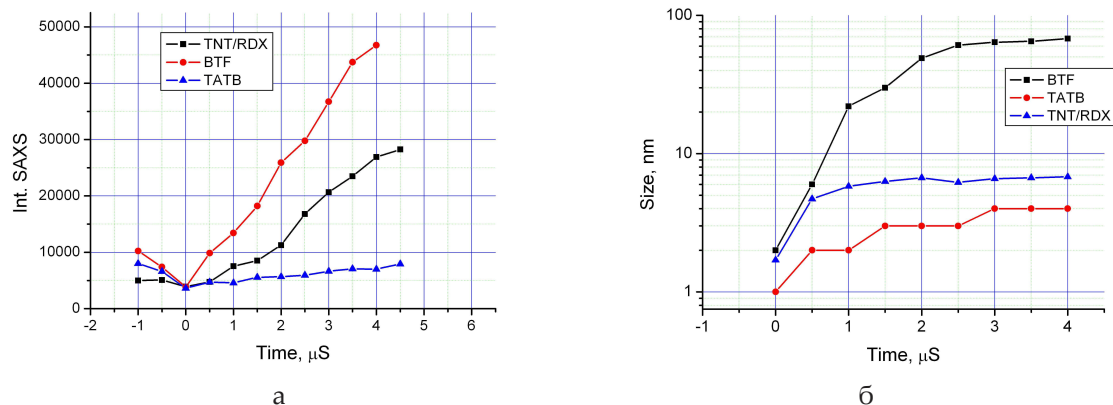


Рис. 5. а - зависимость интегрального МУРР от времени при детонации ВТФ, ТАТБ и TNT/RDX. б - зависимость размеров наночастиц от времени при детонации тех же ВВ. Размеры по вертикали даны в логарифмическом масштабе. Начало отсчета времени соответствует фронту детонации.

Из приведенных графиков следует, что практически на фронте детонации фиксируются наночастицы размером $d \sim 1.0 - 2.0$ нм. Далее размер частиц растет и на время $t=3-4$ мкс достигает размеров $d \approx 2.5-3$ нм у ТАТБ, 6-7 нм у ТГ и ~ 70 нм у БТФ. Столь большие значения размеров наночастиц у БТФ можно объяснить большей температурой на фронте детонации. У зарядов ТАТБ размер конденсированных наночастиц самый малый, и судя по амплитуде интегрального сигнала МУРР, эти наночастицы скорее всего графитоподобные. Возможно присутствие наноалмазов размером менее 2 нм, которые в нашей постановке экспериментов не регистрируются.

Заключение

Создана новая методика исследования процессов детонации. Метод синхротронной диагностики позволяет тестировать структуру детонационной волны, определять границы зоны химической реакции и механические параметры в области разлета продуктов детонации. Впервые примененный для динамических процессов метод малоуглового рассеяния позволил в прямом эксперименте дать оценку времени формирования конденсированного углерода при взрыве.

Используемая литература

1. А.Н. Алешаев, О.В. Евдоков, П.И. Зубков, Г.Н. Кулипанов, Л.Я. Лукьянчиков, Н.З. Ляхов, С.И. Мишнев, К.А. Тен, В.М. Титов, Б.П. Толочко, М.Г. Федотов, М.Р. Шарафутдинов, М.А. Шеромов. Применение синхротронного излучения для исследования детонационных и ударноволновых процессов // Препринт ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН № 2000-92, 2000, 52с.
2. А.Н. Алешаев, П.И. Зубков, Г.Н. Кулипанов, Л.А. Лукьянчиков, Н.З. Ляхов, С.И. Мишнев, К.А. Тен, В.М. Титов, Б.П. Толочко, М.Г. Федотов, М.А. Шеромов. Применение синхротронного излучения для исследования детонационных и ударноволновых процессов // Физика горения и взрыва. 2001, т.37, № 5, с. 104—113
3. А.П. Ершов. Моделирование синхротронной диагностики взрыва // Письма в ЖТФ. 2001, т. 27, вып. 12, с. 90—94.
4. V.M. Titov, B.P. Tolochko, K.A. Ten, L.A. Lukyanchikov, P.I. Zubkov. The formation kinetics off detonation nanodiamonds // In: D.M. Gruen et al (Eds.). "Synthesis, Properties and Applications of ultrananocrystalline Diamond", Proc.Conf.of the NATO ARW (St. Petersburg, Russia, June 7-10, 2004). Springer, Dordrecht 2005, p. 169-187.
5. V.M. Titov, B.P. Tolochko, K.A. Ten, L.A. Lukyanchikov, E.R. Prueel. Where and when are nanodiamonds formed under explosion? // Diamond & Related Materials. V.16, Issue 12, 2007, p. 2009—2013.
6. В.М. Титов, В.М. Аульченко, Б.П. Толочко, Э.Р. Прууэл, К.А. Тен, Л.А. Мержиевский, Л.А. Лукьянчиков. Где не образуются наноалмазы при взрыве? // Тр. Межд. Конф. "IX Харитоновские тематические научные чтения." Под ред. А.Л. Михайлова, Саров, ВНИИЭФ, 2007, с. 68—74.

7. К.А. Тең, О.В. Евдоков, И.Л. Жогин, В.В. Жуланов, П.И. Зубков, Г.Н. Кулипанов, Л.А. Лукьянчиков, Л.А. Мержиевский, Б.Я. Пирогов, Э.Р. Прууэл, В.М. Титов, Б.П. Толочко, М.А. Шеромов. Распределение плотности во фронте детонации цилиндрических зарядов малого диаметра. // Физика горения и взрыва. 2007, т. 43, № 2, с. 91—99.
8. Э.Р. Прууэл, Л.А. Мержиевский, К.А. Тең, П.И. Зубков, Л.А. Лукьянчиков, Б.П. Толочко, А.Н. Козырев, В.В. Литвенко. Распределение плотности разлетающихся продуктов стационарной детонации тротила // Физика горения и взрыва. 2007, т. 43, № 3, с. 121—131.
9. Э.Р. Прууэл, Л.А. Мержиевский, К.А. Тең, Л.А. Лукьянчиков, В.М. Титов. Поле течения продуктов взрыва трубчатого заряда ВВ // Тр. Межд. Конф. "XI Харитоновские тематические научные чтения." Под ред. А.Л. Михайлова, Саров, ВНИИЭФ, 2009, с. 430—435.
10. К.А. Ten, V.M. Titov, E.R. Prueel, L.A. Lukuanchikov, B.P. Tolochko, I.L. Zhogin, Yu.A. Aminov, V.P. Filin, B.G. Loboiko, A.K. Muzyrya, E.B. Smirnov. Measurements of SAXS signal during TATB detonation using synchrotron radiation // Proc. 14th Int. Detonation Symposium. Ed. B. Asay et al. 2010, USA, p. 387—391.
11. E.R. Prueel, K.A. Ten, V.M. Titov, L.A. Lukuanchikov, L.A. Merzhievsky, P.I. Zubkov, B.P. Tolochko, I.L. Zhogin, V.V. Zhulanov, V.M. Aulchenko, L.I. Shekhtman. X-Ray transmission tomography for detonation investigation // Proc. 14th Int. Detonation Symposium. Ed. B. Asay et al. 2010, USA, p. 345—351.
12. К.А. Тең, В.П. Толочко, В.М. Титов, И.Л. Жогин, Э.Р. Прууэл, Л.А. Лукьянчиков. Growth of condensed carbon nanoparticles at detonation of high explosives // In: "Physics of Extreme States of Matter—2010". Ed. V.E. Fortov et al.
13. К.А. Тең, О.В. Евдоков, И.Л. Жогин, В.В. Жуланов, П.И. Зубков, Г.Н. Кулипанов, Л.А. Лукьянчиков, Л.А. Мержиевский, Б.Я. Пирогов, Э.Р. Прууэл, В.М. Титов, Б.П. Толочко, М.А. Шеромов. Измерение распределения плотности в детонационных процессах с помощью синхротронного излучения // Препринт ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН № 2005-9, 2005, 30с.
14. Д.И. Свругун, Л.А. Фейчин. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние // М.: "Наука", Гл. редакция физ.-мат. Литературы, 1986, 278с. O. V. Evdokov, A. N. Kozyrev, V.V. Litvinenko, L. A. Lukianchikov, L. A. Merzhievsky, E. R. Prueel, K. A. Ten, B. P. Tolochko, I. L. Zhogin, P. I. Zubkov. High-speed X-ray transmission tomography for detonation investigation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 575 (2007) 116--120.
15. К.А. Тең, Э.Р. Прууэл, Л.А. Мержиевский, Л.А. Лукьянчиков, В.П. Толочко, И.Л. Жогин, Л.И. Шехтман. Tomography of the flow of detonation products using SR. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 603 (2009) 160--163.
16. К.А. Тең, В.М. Титов, Э.Р. Прууэл, Л.А. Лукьянчиков, В.М. Аульченко, В.В. Жуланов, К.Э. Купер, Л.И. Шехтман, Ю.А. Аминов, А.К. Музыря, Е.Б. Смирнов, Б.Г. Лобойко, Б.П. Толочко, И.Л. Жогин, О.В. Евдоков. Исследование взрывных процессов в детонирующих зарядах диаметром 20 мм с помощью синхротронного излучения. Препринт ИЯФ 2009-021 (619 Кб), Новосибирск, 2009 (in Russian).
17. К.А. Ten, V.M. Aulchenko, L.A. Lukianchikov, E.R. Prueel, L.I. Shekhtman, B.P. Tolochko, I.L. Zhogin, V.V. Zhulanov. Application of introduced nano-diamonds for the study of carbon condensation during detonation of condensed explosives.// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, ISSN 0168-9002, Section A, . Vol. 603, Issue 1-2, 2009, pp. 102-104.
18. V.M. Aulchenko, O.V. Evdokov, L.I. Shekhtman, K.A. Ten, B.P. Tolochko, I.L. Zhogin, V.V. Zhulanov. Current status and further improvements of the detector for imaging of explosions.// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, ISSN 0168-9002, Section A, . Vol. 603, Issue 1-2, 2009, pp. 73-75.
19. . Тең К.А., Титов В.М., Прууэл Э.Р., Лукьянчиков Л.А., Толочко Б.П., Жогин И.Л., Андреевских Л.А., Карпенко И.И., Михайлов А.Л., Шейков Ю.В. Измерение мало-углового рассеяния синхротронного излучения при детонации ВВ на основе ТАТБ. В этом сборнике.