

26. А.Ю. Долгобородов, И.М. Воскобойников. Скорости волновых возмущений за ударным фронтом в алюминии. // Физика горения и взрыва, 1989, т.25, №1, с. 88-93.
27. А.Ю. Долгобородов, И.М. Воскобойников. Скорости звука в ударно-сжатых корунде, карбиде бора и карбиде кремния. // Журнал технической физики. 1993, т. 38, №2, с. 158-160.
28. R.D. Dick. Shock wave compression of benzene, carbon disulfide, carbon tetrachloride and liquid nitrogen. // J. Chem. Phys. 1970, v. 52, №12, p. 6021-6032.
29. М.Ф. Гоголя, А.Ю. Долгобородов, М.А. Бражников. Тонкая структура детонационных волн в смесях октогена с алюминием. // Химическая физика. 1998, т.17. №1, с. 41-44.
30. M.F. Gogulya, A.Yu. Dolgoborodov, M.A. Brazhnikov, G. Baudin. Detonation Waves in HMX/Al mixtures (Pressure and Temperature Measurements) // Eleventh Intern. Detonation Symposium. 1998, ONR 33300-5, p. 979-988.
31. М.Ф. Гоголя, М.А. Бражников, А.Ю. Долгобородов, С.А. Душенюк. Оптическая пирометрия процесса инициирования ЖВВ. // Химическая физика. 199, т.1. №, с. -.
32. Я.Б. Зельдович, С.Б. Кормер, М.В. Сеницын и др. Исследование оптических свойств прозрачных материалов при сверхвысоких давлениях. // ДАН СССР, 1961, т. 138, №6, с. 1333-1340.
33. J. L. Wise, L. C. Chhabildas. Laser interferometer measurements of refractive index in shock compressed materials. // Shock Waves in Condensed Matter-1985, (Y. M. Gupta Ed.), 1986, p. 441-454.
34. C. F. Petrsen, T. Rosenberg. Index of refraction of ethanol and glycerol under shock. // J. Appl. Phys., 1969, v. 40, №7, p. 3044-3046.

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВА ЗА ФРОНТОМ УДАРНЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Зубков П. И.¹, Кулипанов Г.Н.², Лукьянчиков Л.А.¹, Ляхов Н.З.³, Тен К.А.¹, Титов В.М.¹,
Толочко Б. П.³, Федотов М. Г.², Шарафутдинов М. Р.³, Шеромов М. А.

¹Институт гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия.

²Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия.

³Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск, Россия.

Информация о процессах происходящих во фронте ударных и детонационных волн крайне ограничена из-за малых размеров этой зоны (< 1 мм), высокой скорости протекания определяющих процессов (< 0,1 мкс) и предельной агрессивности среды. В то же время в этой области разворачиваются события, провести которые в иных условиях обычно не представляется возможным. Таковыми являются химические превращения при высоких давлениях и температурах, фазовые переходы и др. Набор существующих измерительных методик весьма ограничен и, в настоящее время, не позволяет провести более детальное исследование этой зоны.

Рентгеновское излучение используют для исследования взрывных процессов с 1950 г. [1,2] в основном для фиксации положения плотных сред (кумулятивных струй, осколков). Предпринимались попытки измерения распределения плотности по поглощению излучения в веществе с разрешением по времени порядка 1 мкс. Этому методу измерения сопутствовала низкая точность и неудобство пользования. В другой области применения рентгеновских лучей – структурном анализе – существующая импульсная техника также не нашла применения из-за малой интенсивности и низкого качества параметров излучения рентгеновских аппаратов [1].

Использование синхротронного излучения (СИ) от ускорителей заряженных частиц позволяет по новому решить эту задачу благодаря сочетанию уникальных свойств СИ как источника рентгеновского излучения:

- а) высокая интенсивность потока ($\approx 10^{16-21}$ фотонов/с);
- б) широкий спектральный интервал (энергия 4-100 кэВ);
- в) малая угловая расходимость ($\alpha = 10^{-4} - 10^{-5}$ рад.);

г) высокая периодичность во времени (периодичность - 5 - 250 нс);

д) малое время экспозиции (меньше 1 нс);

Еще одним фактором, повлиявшим на проведение этих исследований, является высокое качество созданной электронной аппаратуры, обеспечивающей регистрацию рентгеновского излучения в наносекундном диапазоне времени.

Описанные ниже эксперименты проводились на стенде, построенном на базе ускорителя электронов ВЭПП-3 в Институте ядерной физики СО РАН. Первые эксперименты по использованию СИ для измерения плотности во фронте детонационных волн показывают принципиальную возможность и большую перспективность проведения таких исследований.

Постановка экспериментов

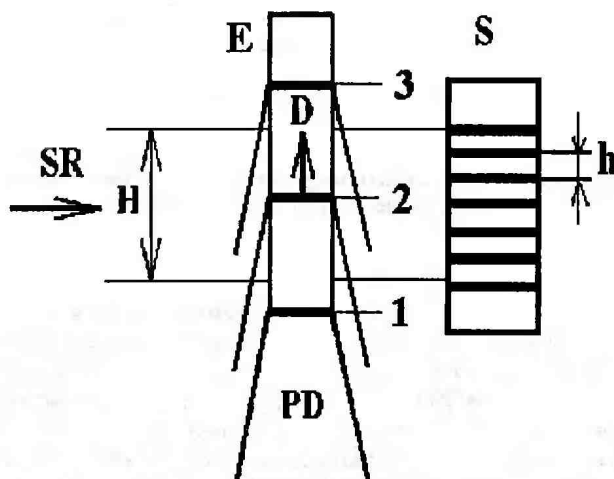


Рисунок 1. Схема постановки экспериментов

E – заряд ВВ, 1, 2, 3 – последовательное положение фронта детонации D через 250 нс, PD – продукты детонации, SR – направление пучка СИ, H – высота пучка, S – микростриповый детектор, h – расстояние между стрипами

Описание стенда приведено в [3,4]. Положение заряда ВВ относительно пучка СИ и детектора показано на рисунке 1. Измерения проводились через 250 нс при длительности импульса менее 1 нс. Ширина пятна прямого пучка СИ на заряде составляла 3 мм, высота $H = 1,8$ мм. Размер пучка по вертикали H выбирался из условия обязательного захвата положения фронта детонации при заданном периоде следования импульсов СИ. Регистрация проходящего излучения велась кремниевым 50 ти стриповым детектором с шагом между стрипами $h = 100$ мкм. Каждый стрип независимо подключался к своему усилителю и АЦП. В экспериментах использовались заряды ВВ, составленные из набора прессованных шашек диаметром 12 мм и длиной 11 мм. Инициирование осуществлялось детонатором АД-15 через промежуточный заряд из насыпного октогена. Общая длина заряда варьировалась от 70 до 100 мм.

Результаты экспериментов

При регистрации использовался принцип саморазвертки процесса. Фронт детонации, движущийся с постоянной скоростью D, последовательно находится в положениях 1, 2, 3. В положении 1 детектор регистрирует интенсивность проходящего излучения, соответствующую начальной плотности заряда ВВ. В положении 2 – детектор «видит» сигнал от исходной плотности и плотности за фронтом детонации. В положении 3 детектор фиксирует среднюю линейную плотность разлетающихся продуктов детонации. Таким образом, наиболее полезная информация о параметрах волны за фронтом получается при съемке процесса в положении 2.

На данном этапе, использовались только три стрипа (и три канала регистрации) с шагом между ними 400 мкм. Запись проходящего излучения для заряда тротил/аммиачная селитра 80/20 приведена на рисунке 2. Положение 2 соответствует точке с временем 0,25 мкс.

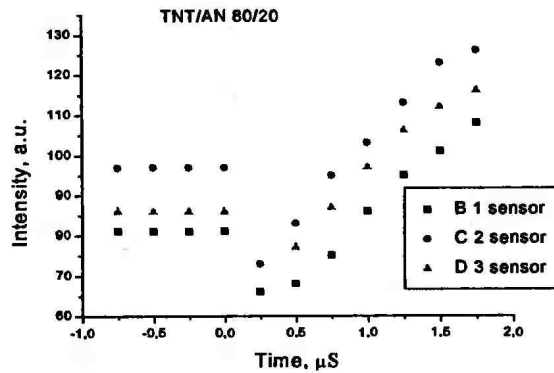


Рисунок 2. Интенсивность проходящего излучения от трех стрипов линейного детектора. Расстояние между стрипами 0,4 мм

Калибровка поглощения излучения

При падении рентгеновского излучения I_0 на исследуемое вещество часть его поглощается, остальная часть проходит дальше, и незначительная часть рассеивается. Если используется монохроматическое излучение, поглощенный сигнал зависит от I_0 и $Y = \rho d$ - линейной плотности вещества. Интенсивность проходящего излучения $I(Y, \lambda)$ равна $I(Y, \lambda) = I_0 \exp(-\alpha(\lambda)Y)$. Здесь $\alpha(\lambda)$ - коэффициент поглощения данного вещества, зависящий от длины волны λ исходного излучения. При использовании «белого» спектра исходного излучения, интенсивность проходящего излучения равна сумме величин $I(Y, \lambda)$, взятой по всем λ . Спектральная плотность используемого СИ от ВЭПП-3 приведена на рисунке 3. (Данные приведены при токе 100 мА, энергии электронов 2 ГэВ, магнитной индукции вигглера 2 Тл.) На этом рисунке: 1 - зависимость спектра излучения СИ после выхода из вигглера, 2 - тоже, после прохождения бериллиевых окон взрывной камеры, 3 - тоже, еще после прохождения прессованного тротила ($\rho = 1,59 \text{ г/см}^3$) толщиной 2 мм, 4 - после прохождения тротила толщиной 12 мм. Видно, что спектр проходящего излучения заметно меняется, что приводит к зависимости общего коэффициента поглощения α от Y . Для калибровки были изготовлены образцы зарядов из прессованного до плотности $\rho = 1,6 \text{ г/см}^3$ тротила и аммиачной селитры толщиной от 1 до 18 мм. Величины $Y = \rho d = \text{м/г}$ для этих образцов были определены с точностью не хуже 0,8%. ($\Delta m < 0,5 \text{ мг}$, $\Delta R < 0,05 \text{ мм}$). В исследуемом диапазоне ($Y = 0,1 - 3,0 \text{ г/см}^2$) поглощение хорошо аппроксимируется параболой:

$$\ln(I / I_0) = -1,26 \cdot Y + 0,16 \cdot Y^2,$$

где I_0 - начальная интенсивность и I - интенсивность прошедшего излучения.

Аналогичная зависимость поглощения была сделана для аммиачной селитры. При расчете поглощения заряда тротил/аммиачная селитра 80/20 бралось поглощение 80% тротила и 20% аммиачной селитры.

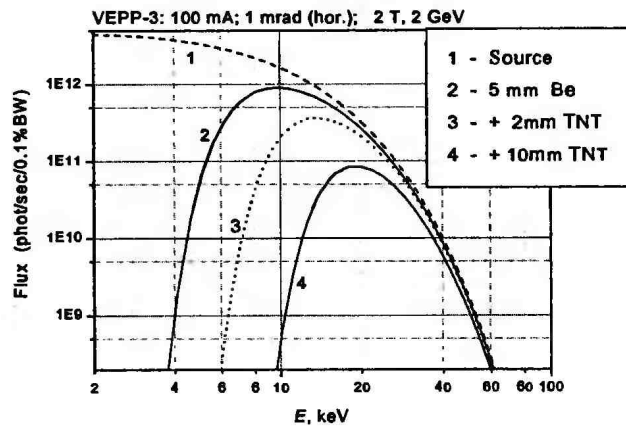


Рисунок 3. Спектральная зависимость излучения из ВЭПП-3 (1), после прохождения окна из бериллия (2), после прохождения еще 2 мм TNT (3), после прохождения еще 10 мм TNT (4). Ток 100 мА, энергия электронов 2 ГэВ, магнитная индукция вигглера 2 Тл

Анализ результатов

Плотность вещества ρ вычисляется из определенной линейной плотности Y : $\rho = Y/d$. Соответственно, точность определения плотности ρ складывается из разброса линейной плотности ΔY из-за погрешности определения α и I , и погрешности $\Delta \rho$ из-за неопределенности истинного диаметра d и влияния кривизны фронта детонации.

$$\left| \frac{\Delta Y}{Y} \right| = \left| \frac{\Delta \alpha}{\alpha} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I \cdot \ln(I_0/I)} \right| \approx 1,6\% + 0,8\% = 2,4\%$$

Погрешность ΔY определяется из:

Для выяснения размытости границ и кривизны фронта детонации была проведена съемка процесса детонации прессованного заряда ТНТ/АС 80/20 на рентгеновском аппарате ПИР-200 (рисунок 4). Качество обработки фотографии позволяет оценить размазывание границ величиной $< 0,25$ мм. Кривизна фронта (максимальная выпуклость) на фотографии не фиксируется, и оценивается значением $< 0,2$ мм.

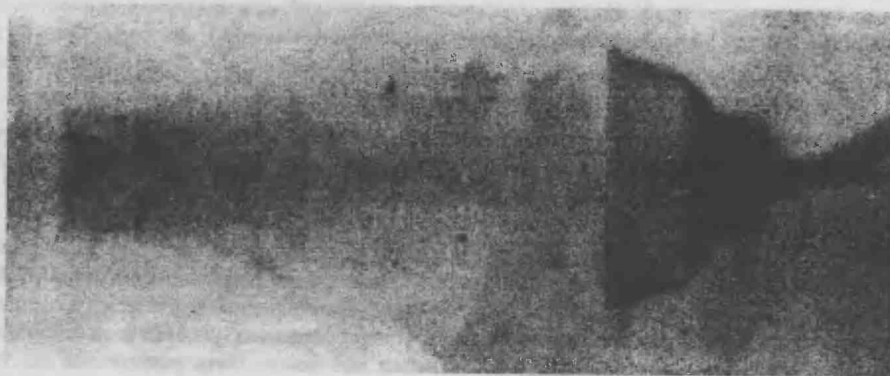


Рисунок 4. Рентгеновский снимок прессованного заряда ТНТ/АС 80/20. Диаметр заряда 12 мм, длина 46 мм

Расположение первого стрипа относительно фронта определяется с точностью 0,4 мм (шаг между стрипами). Меньшее значение плотности, зарегистрированное первым стрипом (рисунках 2 и 6), вероятно связано с прохождением в этот момент фронта детонации (неполным его перекрытием)

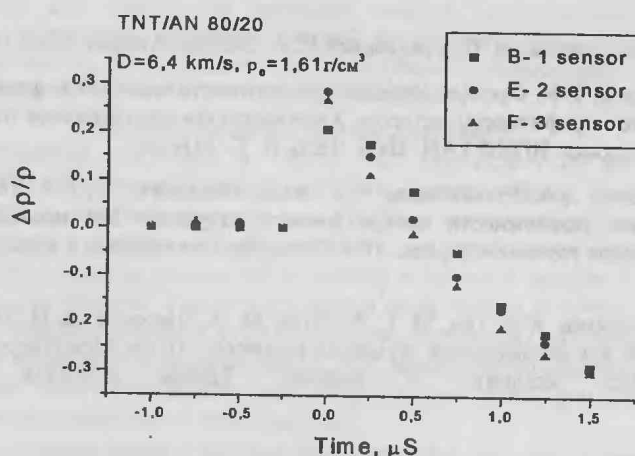


Рисунок 5. Изменение плотности за фронтом детонационной волны в ТНТ/АС 80/20 от времени

Второй стрип находится на расстоянии 0,4 мм, анализируя рентгеновский снимок (рисунок 4), можно оценить размазывание границы заряда $\approx 0,5$ мм с каждой стороны. Таким образом, погрешность определения плотности в данной постановке составляет

Использование всех стрипов (шаг 0,1 мм) уменьшит Δd до 0,5 мм, точность возрастет до 6,8%. Показания детектора в следующие промежутки времени дают среднюю плотность разлетающихся продуктов детонации. Полученное распределение

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \left| \frac{\Delta Y}{Y} \right| + \left| \frac{\Delta d}{d} \right| \approx 2,6\% + 8,3\% = 11\%$$

средней плотности приведено на рисунке 5. Считая скорость детонации постоянной и равной 6,4 км/с, можно получить линейное распределение средней плотности (рисунок 6).

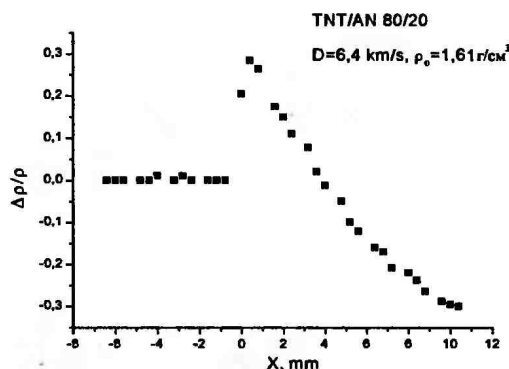


Рисунок 6. Полученное изменение плотности при детонации ТНТ/АС 80/20 в зависимости от координаты

Выводы и перспективы

Представленные результаты впервые в мире показывают возможность использования СИ для дистанционного измерения плотности за фронтом детонации конденсированных ВВ. Приведенные данные для ТНТ/АС 80/20 пока имеют большую погрешность. Тем не менее, видны пути повышения точности:— уменьшение шага между стрипами и увеличение диаметра зарядов. Другой, также очень перспективный способ, это использование ускорителей с большим количеством ступок электронов. На ускорителе ВЭПП-4 время между импульсами СИ может быть уменьшено до 5 нс, что позволит уменьшить погрешность определения плотности до 2,6%. Дальнейшее увеличение точности связано с использованием монохроматического излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты 00-02-17641, 01-02-18031, программы ведущих научных школ (грант 00-15-96181), а также интеграционного гранта СО РАН N 51.

Список литературы

1. Физика быстропротекающих процессов. Под редакцией Н. А. Златина. Москва. Мир. 1984. Том 1. Стр.336-381.
2. В. А. Комрачков, К. Н. Панов, Т. И. Фролова. Определение плотности вещества за фронтом инициирующей ударной волны в ВВ на основе ТАТБ рентгенографическим методом. Химическая физика процессов горения и взрыва. 12-й Симпозиум по горению и взрыву. Черногоровка: ИПХФ РАН, 2000. Часть II. С. 141-144.
3. П. И. Зубков, Г.Н. Кулипанов, Л.А. Лукьянчиков, Н.З. Ляхов, Мишнев С. И., К.А. Тен, В.М. Титов, Б. П. Толочко, М. Г. Федотов, М. А. Шеромов. Возможности синхротронного излучения для исследования детонационных процессов. Химическая физика процессов горения и взрыва. 12-й Симпозиум по горению и взрыву. Черногоровка: ИПХФ РАН, 2000. Часть II. С. 177-178.
4. П. И. Зубков, Л.А. Лукьянчиков, К.А. Тен, М. Г. Федотов, М. А. Шеромов, Б. П. Толочко, О. В. Евдоков. Применение синхротронного излучения для исследования взрывных процессов. Пятая Международная конференция «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике». Тезисы докладов. 2000, Новосибирск, Россия. С. 133-134.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

ДЕТОНАЦИЯ. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

III ХАРИТОНОВСКИЕ

ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ

САРОВ

26 февраля – 2 марта 2001 г.

**под редакцией
доктора технических наук
А.Л. Михайлова**

САРОВ • ВНИИЭФ

2002 г.