

РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА. ДЕТОНАЦИЯ. УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

**ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
VII ХАРИТОНОВСКИЕ
ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ**

14-18 марта 2005 г.

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

РФЯЦ-ВНИИЭФ

САРОВ

2005

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ В ЗОНЕ РЕАКЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА С ПОМОЩЬЮ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

К.А.Тен¹, О.В.Евдоков³, И.Л.Жокин³, В.В.Жуланов², П.И.Зубков¹, Г.Н.Кулиманов², Л.А.Лукьянчиков¹,
Л.А.Мержиевский¹, Б.Б.Пирогов³, Э.Р.Прууэл¹, В.М.Титов¹, Б.П.Толочко³, М.А.Шеромов²

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

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

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

Общепринятая теория детонация предполагает наличие ударного скачка и следующей за ним зоны химической реакции, в которой давление падает и вещество расширяется до параметров Чепмена-Жуге. Информация о процессах в зоне реакции крайне ограничена прежде всего из-за малых размеров этой зоны (< 1 мм), высокой скорости протекания определяющих процессов ($\sim 0,1$ 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. Существующие методики измерения параметров вещества в зоне химической реакции либо вносят возмущения в измеряемый процесс (датчики давления), либо используют промежуточное вещество (фольгу, бромформ). Наиболее точно удается измерить параметры вещества (давление, скорость движения) на торце зарядов взрывчатых веществ (ВВ) [1,2]. Единственным невозмущающим дистанционным экспериментальным способом для измерения параметров (в том числе плотности) вещества в детонационных процессах в настоящее время является рентгеновская диагностика с использованием синхротронного излучения (СИ) [3, 4].

Постановка экспериментов. Эксперименты проводились на станции исследования взрывных процессов, расположенной на «0» канале ускорителя ВЭПП-3 Института ядерной физики СО РАН [5]. Исследовались прессованные гексоген, тротил, а также сплавы тротил/гексоген 50/50. Перед прессованием все ВВ были перекристаллизованы с использованием ацетона. Диаметр прессованных зарядов ВВ составлял 12,5 - 15 мм, литых 7-12,5 мм, длина всех зарядов составляла 8 - 10 калибров. Для инициирования зарядов с диаметром более 12,5 мм использовались «генераторы плоской волны». Заряд ВВ (E) располагался горизонтально (рис. 1) перпендикулярно сформированному пучку СИ (SR) размерами высотой 0,4 мм и шириной $H=18$ мм.

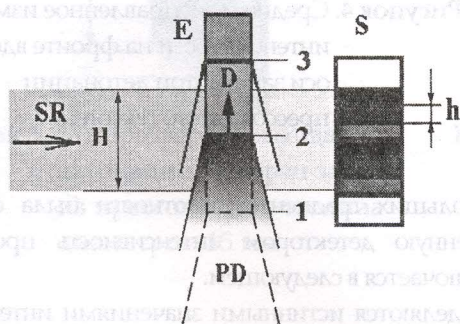


Рисунок 1. Схема постановки экспериментов.

E – заряд ВВ, SR – плоскость пучка СИ,
H – ширина пучка, S – детектор DIMEX,
h – ширина канала регистрации,
D – положение фронта детонации
в моменты времени 1, 2, 3.
PD – разлетающиеся продукты детонации

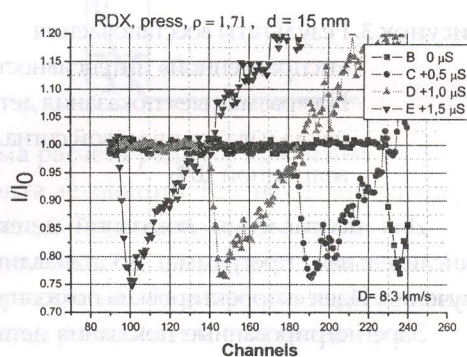


Рисунок 2. Относительное изменение интенсивности вдоль оси заряда при детонации прессованного гексогена. По оси X показаны номера каналов детектора (ширина одного канала – 0,1 мм)

Плоскость пучка СИ проходила вдоль оси исследуемого заряда ВВ. Фронт детонации (D) последовательно проходил положения 1, 2, 3 находясь в зоне пучка СИ в течении 3 – 4 мкс. За это время удавалось сделать 3-5 мгновенных (с экспозицией 1 нс) снимка распределения проходящего излучения вдоль оси заряда. Время между кадрами определялось периодом вращения электронного пучка в ускорителе и составляло 250 - 500 нс. Регистрация излучения велась детектором DIMEX (S), который располагался также вдоль оси заряда на расстоянии 1070 мм от объекта Е. Размеры одного канала регистрации составляли 1 мм в высоту и 0,1 мм вдоль оси заряда, общее число каналов составляло 256 шт. (25,6 мм вдоль заряда). Детектор может записывать 32 кадра, накопленных в таком быстром режиме, и имеет эффективность регистрации >50% для γ -квантов с энергий ~ 30 кэВ [6]. Запуск детектора осуществлялся замыканием контактного датчика, установленного на расстоянии 15 мм за зоной попадания пучка СИ.

Результаты экспериментов. На рис. 2, 3 приведены несколько кадров относительного изменения интенсивности (измеренная интенсивность деленная на начальную) вдоль оси заряда при детонации прессованного (плотность $\rho_0 - 1.71$ г/см³) гексогена. Детонация распространяется в сторону уменьшения номера канала детектора. Время экспозиции каждого из четырех кадров (A, B, C, D) составляет ~ 1 нс, время между первым (B) и вторым (C) кадром и всеми последующими кадрами составляет 0,5 мкс. Определенная по перемещению фронта скорость детонации составила $D = 8.3$ км/с у гексогена и $D = 6.95$ км/с у тротила. Диаметр зарядов был равен 15мм, длина 85мм. Середина изучаемой области находилась в 15 мм от конца заряда.

Особенностью работы с детектором DIMEX является «расплывание» сигнала в случае их больших градиентов [7].

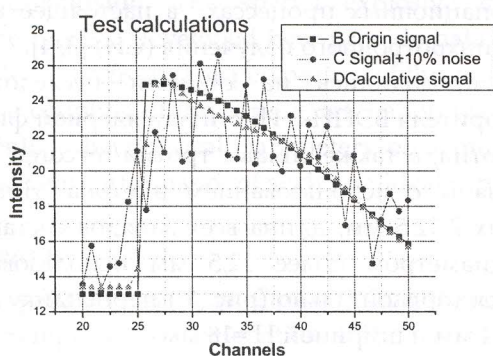


Рисунок 3. Результаты восстановления «исправленной» интенсивности. На «размытые» показания детектора накладывался шумовой сигнал величиной 10%

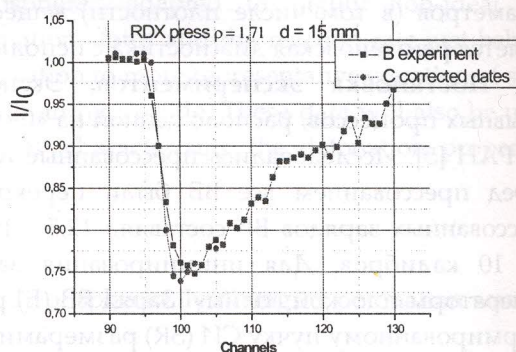


Рисунок 4. Среднее и исправленное изменение интенсивности на фронте вдоль оси заряда при детонации прессованного гексогена

Для исправления показаний детектора в зоне больших градиентов плотности была составлена вычислительная программа, восстанавливающая измеренную детектором интенсивность проходящего излучения. Идея «корректировки» показаний детектора заключается в следующем.

Зарегистрированные показания детектора $Y(x)$ определяются истинными значениями интенсивности $F(x)$ и «размазыванием», которое определяется функцией «аппаратного уширения» $G(x)$. Таким образом экспериментальная кривая $Y(x)$, записанная детектором, представляет множество «размытых» элементов:

$$Y(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\xi) \cdot G(x - \xi) \cdot d\xi \quad (3.1)$$

Реально интегрирование ведется в области определения $Y(x)$.

Вид «аппаратной» функции $G(x)$ выбирался в виде:

$$G(x) = \frac{1}{2\pi} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (3.2)$$

где величина $\sigma = 1.9$ (в размерах канала).

Процедура численного решения обратной задачи по нахождению функции $F(x)$ заключалась в подборе функции $F(x)$ такой, что после вычисления $Y_i^*(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\xi) \cdot G(x_i - \xi) \cdot d\xi$

сумма квадратов невязок стремилась к нулю. $\min \sum (Y_i - Y_i^*)^2 \Rightarrow 0$

На рис. 3 приведены результаты модельной проверки данного метода «исправления» показаний детектора. Кривая В показывает заданную (исходную) интенсивность. На кривой С приведена «размытая» с помощью функции $G(x)$ с наложенным статистическим шумом (амплитудой 10%) детектора. Это и есть реальные показания детектора. С помощью приведенных выше преобразований удается получить «исправленные» значения D. Видно, что разница между значениями D и В составляет менее 1%. На рис.4 приведены записанные детектором DIMEX данные (В) для прессованного гексогена и их «корректированные» данные (С).

Для восстановления массы вещества вдоль луча СИ (ρd) для гексогена и других ВВ была проведена калибровка поглощения детектором DIMEX в зависимости от произведения плотности на толщину зарядов ($Y = \rho d$, г/см²). Калибровались одновременно все каналы. Полученная относительное поглощение хорошо интерполируется параболой [7].

Измерение кривизны фронта детонации. Специфика использования малых диаметров зарядов ВВ приводит к необходимости учета влияния кривизны фронта детонации. Несмотря на использование генераторов плоской волны для инициирования зарядов ВВ, фронт детонации не является абсолютно ровным. На рис. 5 приведен фрагмент фоторазвертки выхода детонации на торец прессованного заряда из тротила. Диаметр заряда равен 15 мм, длина 70 мм, скорость развертки (по фотопленке) – 3 км/с.

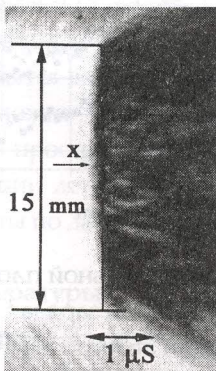


Рисунок 5. Фоторазвертка выхода детонации на торец заряда из прессованного тротила диаметром 15 мм

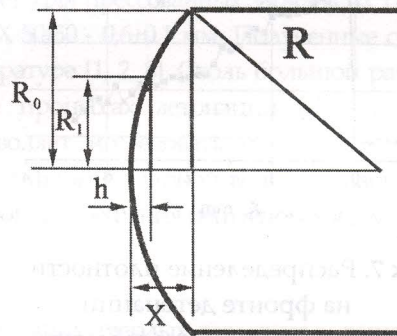


Рисунок 6. Схема расчета радиуса кривизны фронта детонации. R_0 – начальный радиус заряда, X – измеряемая величина выпуклости, h – ширина канала детектора, R_1 – радиус зоны измерения первым каналом (начало роста плотности) детектора

На снимке видно, что фронт детонации можно представить частью сферы радиуса R . Расчет радиуса кривизны проводился по схеме, показанной на рис. 6, а в таблице 1. приведены полученные результаты по измерению радиуса кривизны для зарядов из прессованного тротила и гексогена. Иницирование всех зарядов производилось ППВ. Длина зарядов выбиралась равной длине тех зарядов, на которых проводилось измерение проходящего синхротронного излучения, то есть 70 мм. В таблице 2. приведены такие же параметры, но при точечном инициировании детонатором. Там же приведены данные для сплава тротил/гексоген 50/50 при диаметре зарядов 7 и 12,5 мм.

Таблица 1. Данные по измерению радиуса кривизны фронта детонации прессованных зарядов TNT и RDX и литых TNT/RDX 50/50

	TNT	RDX	TNT/RDX 50/50	TNT/RDX 50/50
Диаметр заряда, мм	15	15	7	12.5
Инициирование	ГПВ	ГПВ	детонатором	детонатором
Скорость детонации, км/с	6,95	8,3	7,55	7,65
Выпуклость на заряде X, мм	0,8896	0,797	0,47	0,778
Радиус кривизны R, мм	31,6	35,3	13,3	25,5
Радиус кривизны в диаметрах	2,1d	2,35d	1,9 d	2,04 d

Радиус кривизны R вычислялся из формулы

$$R^2 = R_0^2 + (R - X)^2, \text{ где радиус заряда } R_0 = d_0/2 \text{ (Диаметр заряда } d_0 = 15 \text{ мм).}$$

$$R = \frac{d_0^2}{8X} + \frac{X}{2} \approx \frac{d_0^2}{8X} \text{ т.к. } \frac{X}{2} \ll \frac{d_0^2}{8X}. \text{ Здесь } X \text{ – размер выпуклости на заряде ВВ.}$$

R_1 – длина хорды ударного фронта, на которой происходит измерение поглощения проходящего излучения находилась из: $R_1^2 = R^2 + (R - h)^2 = h \cdot (2R - h) \approx 2Rh$. Здесь h – ширина приемного канала детектора ($h \approx 0,1$ мм). Аналогично определялись следующие R_2, R_3 и т.д. Зная массу продуктов и значения длин хорд R_1, R_2, R_3 были определены распределения плотности на фронте детонации гексогена, тротила и сплавов ТГ 50/50 (рис. 7-8).

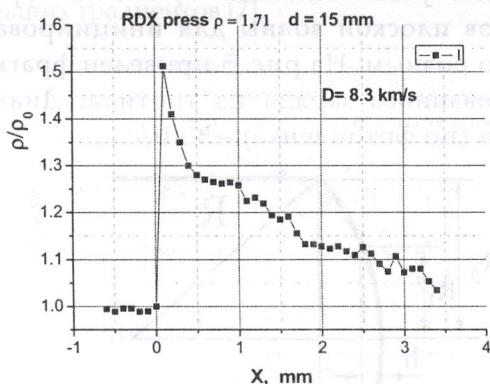


Рисунок 7. Распределение плотности на фронте детонации в прессованном гексогене

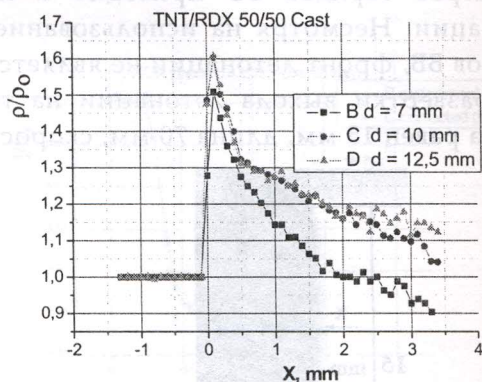


Рисунок 8. Изменение относительной плотности на фронте вдоль оси заряда при детонации литого TNT/RDX диаметром: B–7 мм, C–10 мм, D–12,5 мм

Оценка точности методики. Точность определения плотности ρ складывается из погрешности показаний детектора ΔJ , разброса массы на луче СИ Δm из-за погрешности при калибровке и «размазывания» показаний детектора, и погрешности, связанной с неопределенностью истинного размера сжатой области из-за кривизны фронта детонации.

Погрешность показаний детектора ΔJ при усреднении по трем экспериментам можно считать $\approx 2\%$ [6], т.е. $\frac{\Delta J}{J} \approx 2\%$. К этому значению надо еще добавить погрешность исправления показаний детектора ($\sim 1\%$) и погрешность восстановления массы вдоль луча СИ ($\sim 0.8\%$). $\frac{\Delta Y}{Y} \approx 1\%$ и $\frac{\Delta F}{F} \approx 0,8\%$. В наших экспериментах поверхность фронта детонационной волны приблизительно считалась сферой радиуса R . Погрешность измерения R равна $\left| \frac{\Delta R}{d_0} \right| = \frac{d_0}{8X} \cdot \frac{\Delta X}{X} \approx 23,4\%$ (Ошибка измерения выпуклости $\frac{\Delta X}{X} \approx 10\%$.) Но погрешность

определения размеров сжатой области (величины R_1 , R_2) из-за сферичности фронта детонации составляет

$$\left| \frac{\Delta R_1}{d_0} \right| \approx \frac{1}{4} \sqrt{\frac{h}{X}} \cdot \frac{\Delta X}{X} = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{\frac{0,1}{0,8}} \cdot 0,1 \approx 1\%.$$

Таким образом, погрешность определения плотности в данной постановке в первых каналах детектора составляет

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \left| \frac{\Delta J}{J} \right| + \left| \frac{\Delta Y}{Y} \right| + \left| \frac{\Delta F}{F} \right| + \left| \frac{\Delta d}{d} \right| \approx 1,0\% + 2,0\% + 0,8\% + 1\% = 4,8\%$$

Данная оценка справедлива до момента, когда сферический фронт достигает боковой поверхности заряда. В дальнейшем добавляется погрешность, связанная с разлетом продуктов детонации и неопределенностью параметров при боковой разгрузке.

Приведенные оценки показывают хорошую точность измерения параметров, однако реальная пространственная точность определяется шагом детектора ($h = 0,1$ мм) и расплыванием электрического заряда внутри его («размазывание показаний»). Поэтому пространственная точность измерений ограничивается и еще $\pm h$, то есть $\pm 0,1$ мм.

Обсуждения результатов. Полученные с помощью СИ экспериментальные данные позволяют определить скорость скачка уплотнения (фронта детонации), его ширину и эволюцию во времени.

Скорость детонации у исследованных зарядов ВВ на расстоянии 70 мм имела установившееся значение, совпадающее с известными в литературе, полученными для больших диаметров зарядов ВВ. Скорость детонации сплава ТТ 50/50 при диаметре $d = 7$ мм была равна 7,55 км/с, чуть меньше, чем у зарядов диаметром 12,6 мм ($D = 7,65$ км/с). Радиус кривизны фронта детонации у этого заряда также был меньше, чем у более крупных.

Скорость детонации тексогена на базе 70 мм постоянна, хотя визуально форма распределения поглощения изменяется, то есть разлет продуктов детонации далеко за фронтом не стабилен. У сплава ТТ 50/50 диаметром 7 мм на первой половине происходит разгон детонации с 7,4 до 7,55 км/с.

На распределениях плотности четко фиксируется излом, по которому можно оценить ширину зоны химической реакции (расстояние до плоскости Чепмена-Жуге). Для прессованных зарядов из TNT и RDX они составляют $0,7 \pm 0,1$ и $0,5 \pm 0,1$ мм. Для литого сплава TNT/RDX 50/50 - $0,6 \pm 0,1$ мм. Полученные с помощью СИ данные находятся в пределах разброса с известными в литературе [1, 2, 8]. Столь большой разброс в разных методиках можно объяснить сложностью измерений в процессах детонации конденсированных ВВ. Достигнутое пространственное разрешение $\pm 0,1$ мм позволяет исследовать переходные процессы при инициировании детонации, а также параметры вещества на фронте ударной волны. В настоящий момент ведутся работы по дальнейшему улучшению пространственного разрешения рентгеновского детектора.

Список литературы

1. Б.Г.Лобойко, С.Н.Любягинский. Зоны реакции детонирующих твердых взрывчатых веществ. ФГВ, 2000, т. 36, № 6, стр. 45-64.
2. Уткин А.В., Колесников С.А., Першин С.А. // ФГВ, 2002, Т.38, № 5, С.111.
3. 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 ударно-волновых процессов. // Физика горения и взрыва, 2001, т. 37, № 5, стр. 104-113.
4. A.N.Aleshaev, A.M.Batrakov, M.G.Fedotov, G.N.Kulipanov, N.Z.Lyakhov, L.A.Luk'yanchikov, S.I.Misnev, M.A.Sheromov, K.A.Ten, V.M.Titov, B.P.Tolochko, P.I.Zubkov. Methods of research of the detonation and shock wave processes with the help of SR. Possibilities and prospects. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A, September 1, 2001, Volume 470, Nos. 1-2. pp. 240-244.
5. Тен К.А., Антохин Е.И., Гольденберг Б.Г., Евдоков О.В., Жогин И.Л., Жуланов В.В., Зубков П.И., Каменецкий Ю.М., Кулипанов Г.Н., Лукьянчиков Л.А., Ляхов Н.З., Пирогов Б.Я., Титов В.М., Толочко Б. П., Федотов М.Г., Шарафутдинов М.Р., Шеромов М.А., Успенский А.В. Экспериментальная станция для исследования детонационных и ударно-волновых процессов с помощью синхротронного излучения. // Физика экстремальных состояний вещества - 2003. Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, 2003. Стр. 38-40.

6. V.Aulchenko, Evdokov, S.Ponomarev, L.Shekhtman, K.Ten, B.Tolochko, I.Zhogin, V.Zhulanov. Development of fast one-dimensional X-ray detector for imaging of explosions.// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, Vol. A513, Issue 1-2, p. 383-393.
7. Ten K.A., Evdokov O.V., Zhogin I.L., Zhulanov V.V., Zubkov P.I., Kulipanov G.N., Luk'yanchikov L.A., Merzhievsky L.A., Pirogov B.Ya., Prueel E.R., Titov V.M., Tolochko B.P., Sheromov M.A. Density distribution reconstruction of the detonation products of high explosives with using synchrotron radiation data.// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A, 2005, Vol. 543, Issue 1, 1 May, p. 170-174
8. А.Н.Дремин, С.Д.Савров, В.С.Трофимов, К.К.Шведов. Детонационные волны в конденсированных средах. Наука. Москва. 1970. стр. 164.
9. Зубков П.И., Кулипанов Г.Н., Лукьянчиков Л.А., Ляхов Н.З., Тен К.А., Титов В.М., Толочко Б.П., Федотов М.Г., Шарафутдинов М.Р., Шеромов М.А. Измерение плотности вещества за фронтом ударных и детонационных волн с помощью синхротронного излучения.// Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Саров, ВНИИЭФ, 2002. Стр.306-310.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.В.Родионов¹, В.А.Канаков², С.Ю.Лунов²

¹РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия,

²ННГУ Н.Новгород, Россия

Цель доклада состоит в объяснении методов обработки результатов радиоинтерферометрических исследований ударно-волновых и детонационных процессов, которые обеспечивают достаточно высокую точность оценок параметров газодинамических процессов.

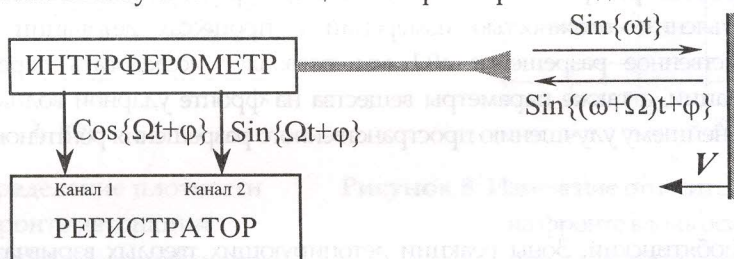


Рисунок 1. Радиоинтерферометрический метод измерения

Суть метода измерений описана в [1] и состоит в следующем (см. рисунок 1). Объект исследования облучается непрерывным гармоническим сигналом $\sin\{\omega t\}$. В простейшем случае одной отражающей границы, на вход приемника возвращается сигнал $\sin\{\omega t + \Omega t + \varphi\}$ с доплеровским сдвигом частоты Ω и избыточным набегом фазы φ , определяемым особенностями отражения от объекта. На выходе интерферометра формируются два квадратурных (отличающихся по фазе на $\pi/2$) сигнала $\sin\{\Omega t + \varphi\}$ и $\cos\{\Omega t + \varphi\}$. Эти сигналы записываются при помощи двухканального цифрового регистратора и составляют интерферограмму эксперимента.

При окончательной обработке результатов строится график, по оси абсцисс которого откладываются отсчеты косинусного канала интерферограммы, а по оси ординат — одновременные отсчеты синусного канала, так называемый годограф интерферограммы. Изменение углового положения радиус-вектора годографа несет информацию о перемещении объекта:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{\varepsilon}} \Delta \psi \quad (1)$$