

МИКРОВОЛНОВАЯ ДИАГНОСТИКА УДАРНО-ВОЛНОВЫХ И ДЕТОНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

В. М. Бельский, А. Л. Михайлов, А. В. Родионов, А. А. Седов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, rodial@yandex.ru

Описан метод измерения параметров ударно-волновых и детонационных процессов с использованием микроволновых интерферометров. Приведено описание методики постановки экспериментов и способа обработки экспериментальных данных. Рассмотрены примеры экспериментальных исследований, выполненных с использованием радиоинтерферометра трехмиллиметрового диапазона.

Ключевые слова: детонация, ударно-волновые процессы, диагностика, радиоинтерферометр, микроволновое излучение.

ВВЕДЕНИЕ

Радиоинтерференционный метод измерения расстояний с помощью радиоволн разработан Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси в начале тридцатых годов прошлого века [1]. Первоначально метод был реализован на средних длинах волн ($\lambda = 100 \div 600$ м) и использовался в навигации и геодезии. Достаточно скоро, по мере освоения микроволнового диапазона, была показана возможность применения радиоинтерференционного метода для исследования быстропротекающих процессов [2], а именно для измерения параметров движения различных материальных объектов, ударно-волновых и детонационных фронтов, а также для диагностики плазмы.

Развитие аналогичных оптических приборов тормозилось из-за отсутствия мощных источников когерентного излучения. Изобретение оптических квантовых генераторов полностью устранило проблему и привело к созданию семейства лазерных интерферометрических методов и соответствующих прецизионных измерительных приборов.

Основная особенность интерференционных методов состоит в том, что для измерения расстояний в них используется непрерывное излучение (в отличие от локации, где применяются импульсно-модулированные сигналы). Благодаря этому принципиально возможна непрерывная регистрация перемещения отражающего объекта. Если к сказанному добавить, что интерференционные методы измерения не вносят возмущений в исследуемый процесс, то их предпочтительность перед широко известными, использующими различного рода датчики,

становится очевидной.

Опуская технические детали, можно сказать, что по своей физической сути лазерные и микроволновые интерферометрические методы ничем не различаются. Основная разница между ними определяется частотой используемого электромагнитного излучения: в сравнении с лазерными методами микроволновая диагностика использует на 3–4 порядка более длинные волны, поэтому, имея, быть может, несколько более скромные точностные показатели, она обладает определенными достоинствами.

Во-первых, используя микроволны, можно проводить измерения в радиопрозрачных средах, класс которых гораздо шире, чем класс оптически прозрачных сред. В частности, радиопрозрачными являются практически все взрывчатые вещества (ВВ), кроме содержащих большое количество проводящих добавок. Следовательно, микроволновой интерферометрии доступна непосредственная диагностика возбуждения, развития и распространения детонации, что недоступно лазерной диагностике.

Во-вторых, масштаб естественной шероховатости зондируемой поверхности реальных тел (шероховатость свободной поверхности твердого тела после механической обработки, микроструктура поликристаллических сред, гетерогенность динамического деформирования металлов на внутризеренном уровне, структурные дефекты и включения, гетерогенность конденсированных ВВ и т. д.) имеет порядок $1 \div 100$ мкм. Для микроволнового излучения (с длиной волны $1 \div 100$ мм) такие поверхности, т. е. практически все представляющие

интерес газодинамические разрывы, являются зеркальными отражателями, тогда как оптическое излучение от таких поверхностей отражается диффузно, что создает определенные проблемы в лазерной доплеровской диагностике и трактовке ее результатов.

В-третьих, поскольку отражение радиоизлучения происходит на скачке диэлектрической проницаемости (или проводимости) среды, микроволновой диагностике доступны не только скачки плотности среды, но и ее структурные превращения, в том числе процессы ионизации, диссоциации и конденсации вещества в ударных волнах и волнах сжатия/разрежения.

И наконец, широкий спектральный диапазон микроволновых устройств — от дальней инфракрасной области до применяемого нами миллиметрового диапазона и далее — открывает, по нашему мнению, большие перспективы для динамической диагностики газодинамических процессов в радиопрозрачных материалах, включая непрерывные измерения температуры (радиометрия).

В первых радиоинтерферометрических системах использовались аналоговые методы регистрации и обработки сигналов, что позволяло проводить только достаточно простые, относительно грубые измерения быстропротекающих процессов. В это время среди исследователей считалось, что предельное разрешение метода по перемещению составляет половину длины волны зондирующего излучения. Для того чтобы устранить это чисто методическое ограничение и обеспечить возможность более тонких измерений, потребовался переход к цифровым методам, который и произошел в начале 80-х годов прошлого века [3].

Развитие дискретных методов существенно повысило информативность экспериментов, позволило провести детальный анализ источников погрешностей, усовершенствовать экспериментальную технику и, как следствие, значительно повысить точность. При нынешнем уровне техники довольно легко достигается погрешность измерения перемещений $0.05 \div 0.1$ от длины волны и даже менее, что практически сделало понятие «разрешение по перемещению» (не путать с пространственным разрешением!) устаревшим.

В Институте экспериментальной газодинамики и физики взрыва (ИФВ) РФЯЦ-ВНИИЭФ радиоинтерферометрические мето-

ды применяются с 2000 г. Сегодня в институте при помощи микроволновой интерферометрии решаются следующие задачи:

- исследование структур течений при ударно-волновых и детонационных процессах;
- исследование детонационных свойств ВВ: измерение параметров стационарной детонации, возбуждение детонации ударной волной, волной горения;
- исследование метания пластин и оболочек: определение энергетических характеристик ВВ, исследование процесса передачи энергии взрыва ВВ лайнеру или оболочке;
- определение динамической сжимаемости радиопрозрачных материалов;
- исследование фазовых переходов в диэлектриках;
- исследование динамики ствольных систем;
- исследование динамики конструкций.

В предлагаемой статье представлены схемы проведения и результаты некоторых экспериментальных исследований, выполненных в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ, с применением одноканального радиоинтерферометра с длиной волны зондирующего излучения $\lambda = 3.2$ мм.

1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА

Суть радиоинтерферометрического метода измерений параметров движения физических объектов состоит в следующем (рис. 1).

Объект исследования облучается непрерывным гармоническим сигналом $\sin(\omega_0 t)$. В простейшем случае одной отражающей границы на вход приемника возвращается сигнал $\sin(\omega_0 t + \Omega t + \varphi)$ с доплеровским сдвигом частоты Ω и избыточным набегом фазы φ , определяемым особенностями отражения от объек-

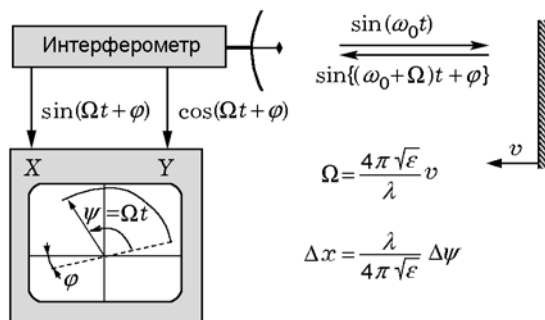


Рис. 1. Радиоинтерферометрический метод измерения

та. На выходе интерферометра формируются два квадратурных (отличающихся по фазе на $\pi/2$) сигнала $\sin(\Omega t + \varphi)$ и $\cos(\Omega t + \varphi)$, которые записываются двухканальным цифровым регистратором. 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:

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

где λ — длина волны зондирующего излучения, ε — диэлектрическая проницаемость среды, в которой движется отражатель, $\Delta\psi = \Omega(t)\Delta t$ — изменение полной фазы сигнала между смежными отсчетами, Δt — период выборки сигналов при регистрации.

Величина доплеровского сдвига частоты зависит от скорости отражающей поверхности v :

$$\Omega(t) = \frac{4\pi\sqrt{\varepsilon}}{\lambda} v(t). \quad (2)$$

В более сложном случае исследуемый объект может содержать несколько отражающих границ. При этом спектр отраженного сигнала будет включать большое число компонентов. Подробно этот случай рассмотрен ниже.

Если интерферограмма содержит единственную спектральную компоненту на фоне аддитивного гауссова шума, то алгоритм определения параметров движения исследуемого объекта по выходным сигналам интерферометра предполагает получение оценки мгновенной частоты и текущей фазы интерферограммы при известной длине волны зондирующего излучения в исследуемой среде. Расчет погрешностей в этом случае состоит в оценке параметров распределений фазы и ее производной для радиус-вектора интерферограммы, координаты которого независимы и имеют нормальное распределение. Не вдаваясь в подробности (описанные, например, в [4]), отметим только, что вид искомых распределений (а соответственно, и погрешность измерения перемещений и скоростей исследуемых объектов) зависит от отношения сигнал/шум в интерферограмме, и если это отношение достаточно велико, то закон обоих распределений —

нормальный. Таким образом, для определения погрешностей измерения, как правило, достаточно проверить апостериорные эмпирические распределения на соответствие нормальному закону и определить их параметры.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ ДЕТОНАЦИИ В СОСТАВНОМ ОБРАЗЦЕ

Измерения скорости детонации ВВ с точки зрения радиоинтерферометрии относятся к наиболее простым. Типичная схема эксперимента показана на рис. 2.

Исследуемый заряд собирался из отдельных пашек, которые прижимались друг к другу плоскими сторонами, и инициировался с использованием генератора плоской детонационной волны (линзы), который, в свою очередь, инициировался через пруток из пластического ВВ для устранения действия электрических наводок.

Процесс распространения детонационной волны вдоль составного образца регистрировался при помощи радиоинтерферометра через отрезок диэлектрического волновода с антенной, приклеенной к пластине из полиметилметакрилата (ПММА), которая состыковывалась с последней (по ходу детонационной волны) пашкой из исследуемого ВВ.

На рис. 3 представлена экспериментальная интерферограмма детонации образца из четырех пашек $\varnothing 60 \times 40$ мм из пластифицированного октогена (для выделения особенностей метода выбраны пашки с длительным сроком хра-

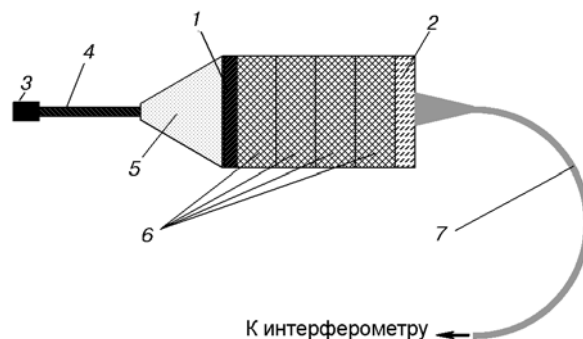


Рис. 2. Схема измерения скорости стационарной детонации в составном образце из ВВ:

1 — дополнительный детонатор, 2 — пластина из ПММА, 3 — электродетонатор, 4 — пруток из пластического ВВ, 5 — детонационная линза, 6 — составной образец из испытываемого ВВ, 7 — диэлектрический волновод с антенной

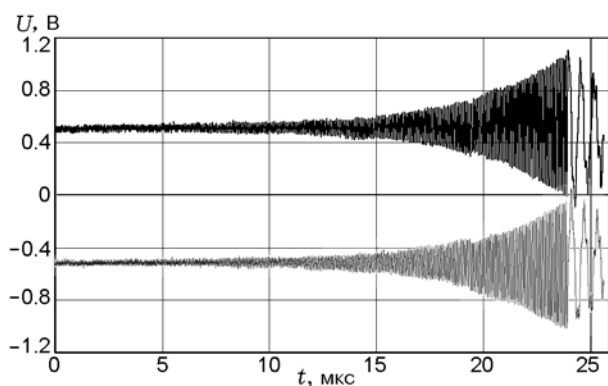


Рис. 3. Экспериментальная интерферограмма детонационной волны в пластифицированном октогене

нения). На рис. 4 показан результат обработки интерферограммы — $X-t$ -диаграмма распространения детонационной волны. Для того чтобы лучше были видны детали, диаграмма приведена с удаленным линейным трендом.

На рис. 4 хорошо видно, что «шумность» $X-t$ -диаграммы заметно убывает по мере приближения детонационного фронта к краю образца. Это происходит потому, что амплитуда интерферограммы по мере движения фронта монотонно возрастает, а шумы регистрации (в значительной мере определяемые используемой аппаратурой) практически не меняются. Погрешность измерения перемещения фронта определяется путем анализа ширины «шумовой дорожки» на $X-t$ -диаграмме и не превышает в последней шашке образца ± 0.011 мм, в предпоследней — ± 0.025 мм.

На рис. 5 приведена зависимость скорости

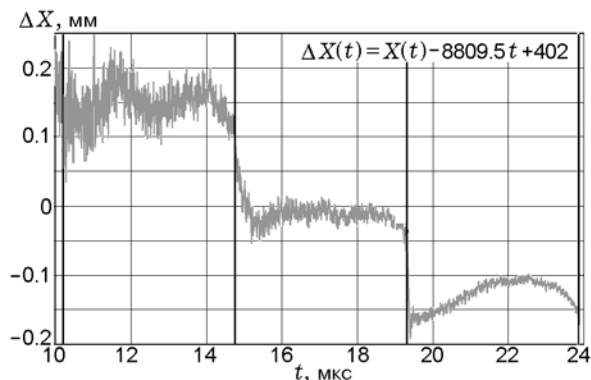


Рис. 4. $X-t$ -диаграмма перемещения фронта детонационной волны с удаленным линейным трендом:

вертикальные линии — границы шашек

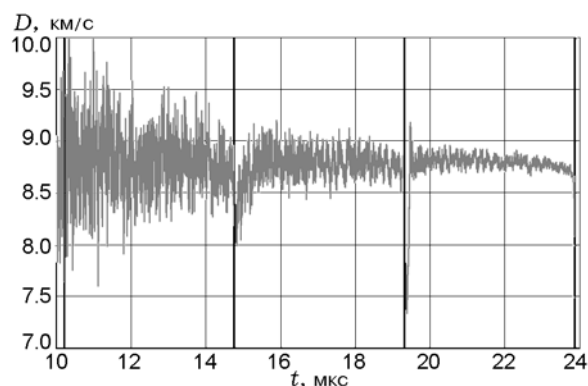


Рис. 5. Скорость перемещения фронта детонационной волны в образце из пластифицированного октогена диаметром 60 мм

перемещения фронта детонационной волны от времени (величина, осредненная на интервале ≈ 1 мм). Хорошо заметно убывание погрешности измерения по мере приближения детонационного фронта к антенне. Также наблюдаются заметные вариации скорости детонации на интервале измерения, в частности короткие «провалы» на стыках и некоторое снижение скорости детонации к торцам шашек относительно середины, что может быть следствием технологии их изготовления либо результатом длительного хранения.

Аналогичные эксперименты были проведены для образцов из прессованного чешуированного тротила (ТНТ) и пластифицированного триаминотринитробензола (ТАТБ). В опытах с ТНТ выявлен иной характер изменения скорости детонационной волны вдоль образца — некоторый рост скорости к стыкам, при этом сами стыки шашек практически не проявились. В экспериментах с ТАТБ, наоборот, «провалы» скорости детонации на стыках выражены сильнее, чем на рис. 5, но других заметных вариаций скорости не обнаружено.

С целью иллюстрации метода оценки погрешности измерения на рис. 6, а показан результат измерения скорости детонации в последней шашке образца из пластифицированного октогена. Серым цветом нанесен соответствующий фрагмент кривой с рис. 5, черным цветом — результат ее аппроксимации кубическим сплайном с равноотстоящими узлами. Для определения шумовой составляющей из исходной зависимости вычитается сглаженная. Результат вычитания центрирован и имеет меняющийся размах из-за изменения отношения

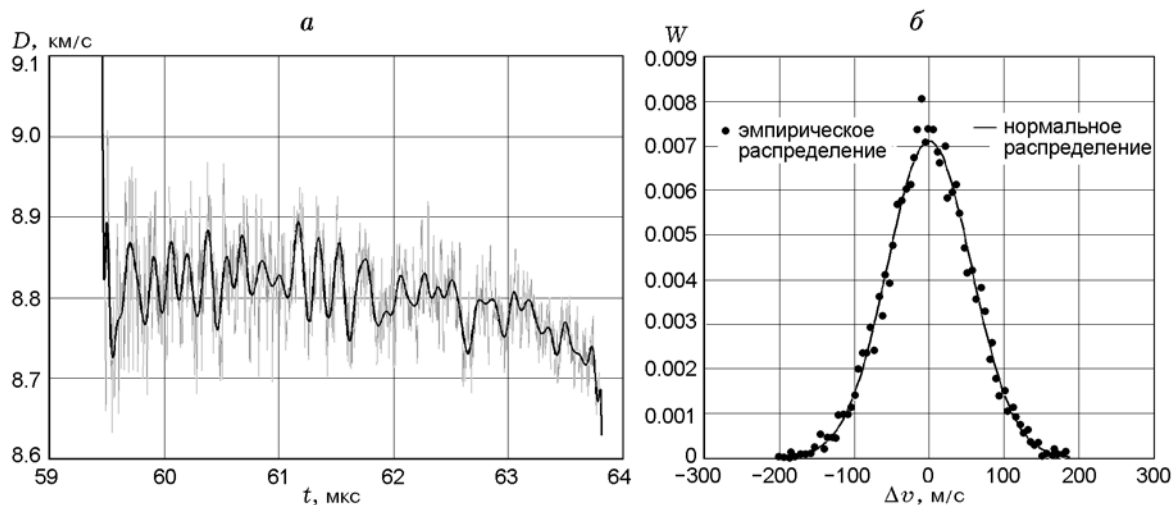


Рис. 6. Результат измерения скорости детонации в последней шашке образца из пластифицированного октогена (а) и гистограмма распределения приведенного шума (б)

сигнал/шум в интерферограмме, поэтому он приводится к стационарному шуму с максимальным на выбранном интервале среднеквадратическим отклонением. При обработке количество узлов сплайна увеличивается до тех пор, пока распределение шумовой составляющей сигнала не станет нормальным. На рис. 6, б показана гистограмма распределения приведенного шума. Величина стандартного отклонения для полученной оценки — $S_D \approx 56$ м/с. Таким образом, погрешность измерения скорости детонации пластифицированного октогена ($\Delta D \approx 1.96 S_D$ при доверительной вероятности 95 %) в этом опыте не превышала 110 м/с (1.3 % средней скорости) на всем интервале измерения ($\bar{D} \approx 8800$ м/с).

Приведем аналогичные оценки для других упомянутых выше опытов: для ТНТ — $\Delta D \approx 63$ м/с (0.9 %, $\bar{D} \approx 7000$ м/с), для пластифицированного ТАТБ — $\Delta D \approx 95$ м/с (1.3 %, $\bar{D} \approx 7720$ м/с). Отметим, что погрешность измерения средней скорости детонации в последних шашках составных образцов для всех составов не превышала ± 0.2 %.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВВ

Процесс горения энергетических материалов является одним из самых «неудобных» для исследования при помощи микроволновых интерферометров. Не останавливаясь на многочисленных методических проблемах, достаточно подробно описанных в работе [5], ограничимся опытом по измерению скорости послы-

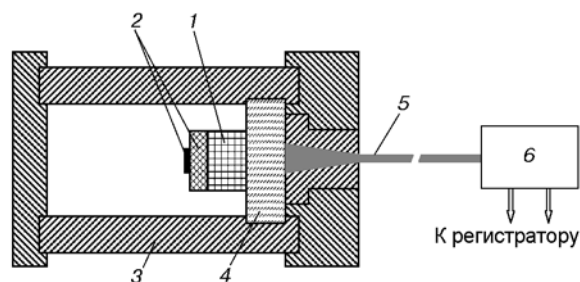


Рис. 7. Схема измерения скорости горения ВВ: 1 — образец, 2 — воспламенитель, 3 — защитная камера, 4 — прозрачное окно, 5 — диэлектрический волновод с антенной, 6 — интерферометр

ного горения ВВ при атмосферном давлении, чтобы проиллюстрировать исследование низкоскоростного процесса.

Схема регистрации процесса горения цилиндрического образца из пластифицированного октогена $\varnothing 40 \times 40$ мм представлена на рис. 7. Исследуемый образец размещался в защитной камере в непосредственной близости с радиопрозрачным окном. Образец поджигался нагревателем (в виде спирали из нихромовой проволоки) через толстую пластину из пластического ВВ. Зондирующее излучение поступало в образец через радиопрозрачное окно.

Интерферограмма опыта приведена на рис. 8. Видно, что в данной постановке эксперимента при регистрации движения фронта пламени соотношение сигнал/шум достаточно мало. Это связано не только с малым коэффици-

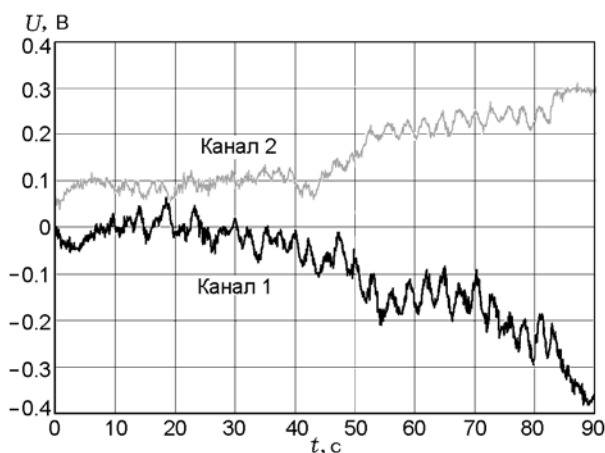


Рис. 8. Интерферограмма опыта

ентом отражения зондирующего излучения от фронта пламени, но, по-видимому, и с локальными пульсациями скорости горения по зондируемой поверхности, а также с нерегулярным характером поверхности фронта.

$X-t$ -диаграмма горения образца из пластифицированного октогена представлена на рис. 9, *a*, а изменение скорости горения во времени — на рис. 9, *б*.

Скорость горения пластифицированного октогена при нормальном давлении, определенная по полученной интерферограмме, составляет ≈ 0.3 мм/с, что согласуется с известными данными [6].

4. ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ СЖИМАЕМОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Принципиальная возможность одновременной регистрации при помощи радиоинтерферометра двух кинематических параметров: скорости ударной волны (D) и массовой скорости (u) — в экспериментах по определению динамической сжимаемости веществ была обоснована в [7] (для пористых сред в волноводе) и в [8] (для свободного пространства) на примере фторопласта. Ниже приведены результаты исследования бензола и полистирола.

Схема эксперимента показана на рис. 10. Аналогичная постановка опыта описана в [9].

Ударная волна прямоугольного профиля в исследуемом образце генерировалась с помощью плоских измерительных устройств с медными и алюминиевыми экранами в различных сочетаниях с активными зарядами ВВ различной калорийности.

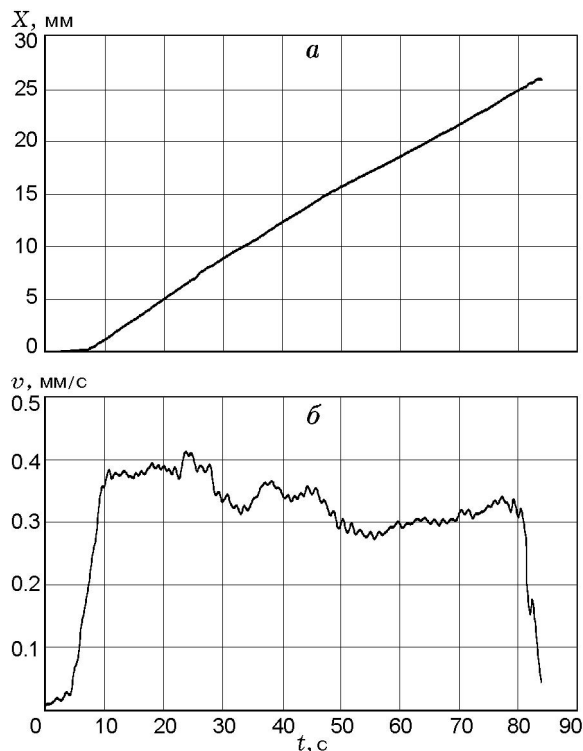
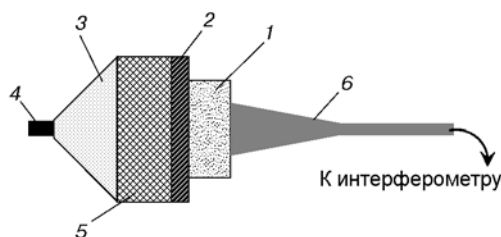
Рис. 9. $X-t$ -диаграмма (*a*) и $v-t$ -диаграмма (*б*) горения образца из пластифицированного октогена

Рис. 10. Схема регистрации распространения ударной волны и определения массовой скорости в диэлектрике:

1 — образец, 2 — металлический экран (Al, Cu), 3 — детонационная линза, 4 — электродетонатор, 5 — заряд ВВ, 6 — диэлектрический волновод с антенной

Эксперимент по регистрации распространения ударной волны и массовой скорости в диэлектрике принципиально отличен от описанных выше. Этот пример является яркой иллюстрацией методов многомодовой интерферометрии [10]. Действительно, в объекте исследования присутствуют две движущиеся с разными скоростями отражающие поверхности — фронт ударной волны и металлический экран.

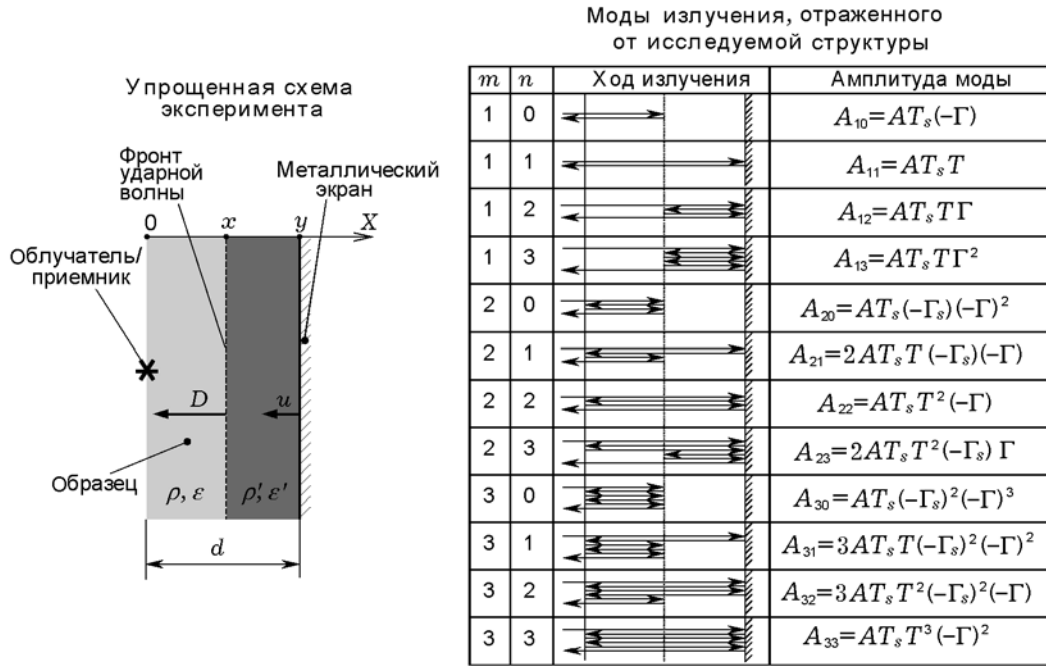


Рис. 11. Многомодовая модель распространения радиоволн (относительно рис. 10 все изображения развернуты справа налево)

При этом осуществляется множество вариантов распространения радиоволн в образце толщиной d (рис. 11), отличающихся числом отражений от каждой из границ (индексы m и n). В последнем столбце таблицы рис. 11 приведены формулы для расчета соответствующих амплитуд A_{mn} через коэффициенты прохождения (T_s — поверхность образца, T — фронт ударной волны) и отражения (Γ_s — поверхность образца, Γ — фронт ударной волны) границ раздела; A — амплитуда излучения источника. Модуль коэффициента отражения от металлического экрана полагался равным единице. Модели распространения радиоволн в сходных структурах описаны, например, в [11, 12]. Для лучшей наглядности в формулах опущены члены, связанные с расходимостью пучка зондирующего излучения.

Итоговая формула для расчета выходного сигнала интерферометра по модели исследуемого объекта выглядит следующим образом:

$$S(t) = A \cos \omega t + \sum_m \sum_n A_{mn} \cos(\omega t - m\phi + n\omega D u t - m\omega D t), \quad (3)$$

где

$$\phi = 2\pi \frac{2d}{\lambda} \sqrt{\epsilon}, \quad \omega D u = 2\pi \frac{2(D-u)}{\lambda} \sqrt{\epsilon'},$$

$$\omega_D = 2\pi \frac{2D}{\lambda} \sqrt{\epsilon}.$$

Параметры движения границ и диэлектрическая проницаемость ударно-сжатых диэлектриков определялись путем минимизации невязки между модельным и экспериментально измеренным сигналами:

$$F(T) = \int_0^T (S(t) - S_{exp}(t))^2 dt. \quad (4)$$

В связи со сказанным отметим, что для корректности обработки результатов в экспериментальных исследованиях необходимо обеспечить сжатие образца ударной волной прямоугольного профиля. Только в этом случае скорость движения металлического экрана и массовая скорость в образце тождественно равны.

Типичная интерферограмма эксперимента по регистрации распространения ударной волны и определению массовой скорости в бензоле, а также ее годограф представлены на рис. 12.

Определенные при помощи радиоинтерферометра параметры ударных волн в бензоле (начальная плотность $\rho_0 = 0.89 \text{ г/см}^3$; $\epsilon_0 =$

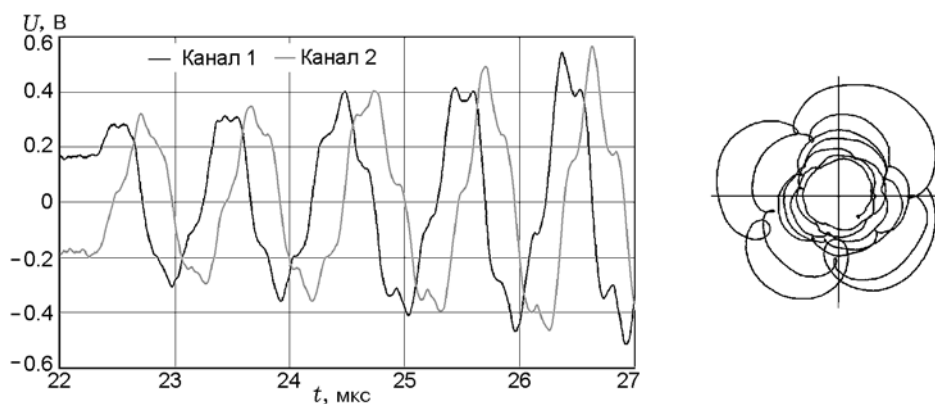


Рис. 12. Интерферограмма эксперимента по регистрации распространения ударной волны и определению массовой скорости в бензоле (а) и годограф интерферограммы (б)

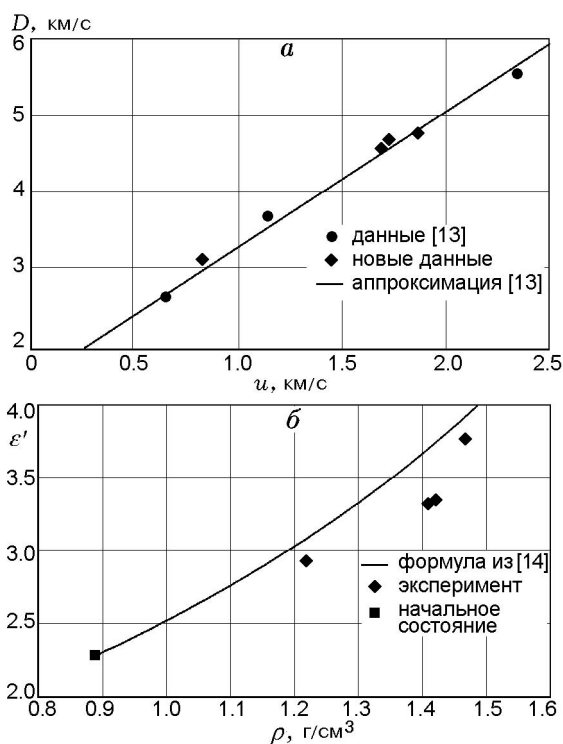


Рис. 13. Параметры ударных волн в бензоле: а — D - u -соотношение, б — зависимость диэлектрической проницаемости от плотности

2.28) приведены на рис. 13 совместно с результатами [13]. Там же показаны измеренные значения диэлектрической проницаемости сжатого материала ε' в зависимости от плотности и теоретическая зависимость $\varepsilon(\rho)$, вычисленная по формуле Клаузиуса — Мосотти [14].

Совокупность полученных результатов показывает, что при помощи радиоинтерферо-

метра можно с хорошей точностью регистрировать оба кинематических параметра движения ударной волны в радиопрозрачных средах, при этом дополнительно определяется диэлектрическая проницаемость (показатель преломления) ударно-сжатого вещества.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

Исследование инициирования твердых гетерогенных ВВ ударными волнами рассмотрим на примере пластифицированных октогена и ТАТБ [15].

Схема экспериментов полностью повторяет схему эксперимента по регистрации распространения ударной волны и массовой скорости в диэлектрике (см. рис. 10), только в качестве диэлектрика используется исследуемое ВВ.

Образцы из пластифицированного октогена представляли собой детали цилиндрической формы $\varnothing 60 \times 20$ мм, плотностью $\rho_0 = 1.884 \div 1.886$ г/см³, образцы пластифицированного ТАТБ — детали цилиндрической формы $\varnothing 90 \times 40$ мм, плотностью $\rho_0 = 1.890$ г/см³.

Типичные экспериментальные интерферограммы приведены на рис. 14. Видно, что качественный характер формирования детонационного режима одинаков у обоих составов. На рисунках штриховыми линиями выделены характерные моменты времени, соответствующие различным фазам процесса возбуждения детонации в образце. В момент времени t_1 начинается перемещение границы экран — образец, при этом часть зондирующего излучения отражается от фронта ударной волны в образце. В момент t_2 поглощение в сжатом объеме

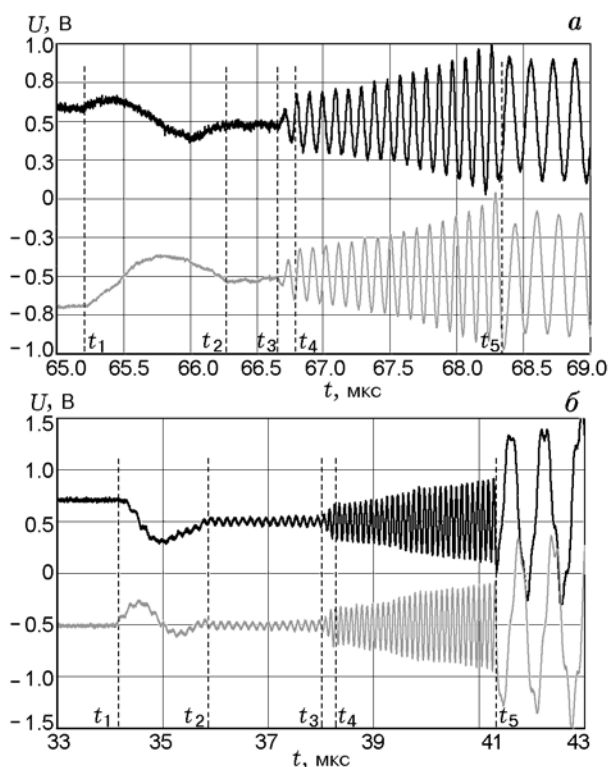


Рис. 14. Интерферограмма процесса инициирования детонации ударной волной в пластифицированном октогене (а) и пластифицированном ТАТБ (б)

ВВ приводит к пропаданию отраженного от металла сигнала, при этом отражение излучения от фронта ударной волны в образце не исчезает. При t_3 начинается рост отражения зондирующего излучения от исследуемой структуры, при t_4 коэффициент отражения стабилизируется.

Особый интерес, с нашей точки зрения, представляет интервал времени $t_2 \div t_3$, когда ударно-сжатое ВВ, заключенное между металлическим экраном и фронтом ударной волны, теряет свою радиопрозрачность. Это может быть связано как с формированием за фронтом ударной волны стохастически распределенных «горячих точек», не сформировавшихся в единый фронт горения-ионизации, так и образованием радиопоглощающих соединений (радикалов).

Глубина возбуждения детонации в образце определяется из величины полного набега фазы интерферограммы $\Delta\varphi$ с момента возникновения стационарной детонации (момент времени t_4) до выхода детонационной волны на свобод-

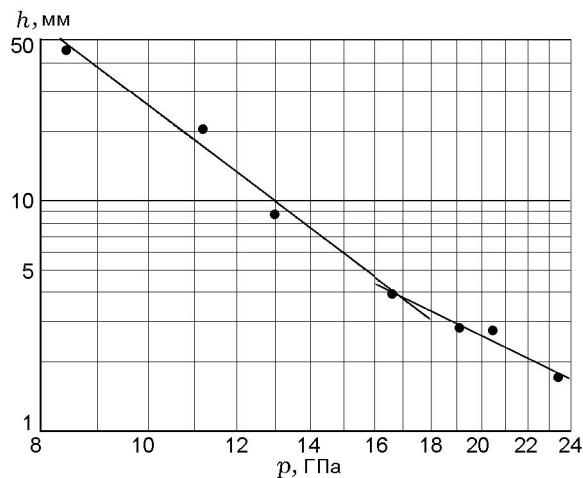


Рис. 15. Зависимость глубины возбуждения детонации в пластифицированном ТАТБ от давления в инициирующей ударной волне

ную поверхность образца (момент времени t_5) по формуле

$$\Delta X = h - \frac{\Delta\varphi\lambda}{4\pi\sqrt{\epsilon}},$$

где h — толщина образца, λ — длина волны зондирующего излучения, ϵ — диэлектрическая проницаемость ВВ.

Экспериментальные результаты, полученные для пластифицированного ТАТБ, представлены на рис. 15. Отметим, что излом на зависимости при давлении $p \approx 17$ ГПа практически совпадает по величине давления с описанным в [16] изломом зависимости скорости горения ТАТБ в сопоставимых условиях.

6. МЕТАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН ВЗРЫВОМ ЗАРЯДА ВВ

Постановка экспериментов по непрерывной регистрации разгона метаемых пластин продуктами взрыва конденсированного ВВ приведена на рис. 16.

Одновременно с измерением радиоинтерферометром проводились подобные измерения в соседней зоне метаемого лайнера с помощью лазерной интерферометрии ($\lambda = 0.552$ мкм) по оптическим схемам Фабри — Перо и Майкельсона (модифицированный VISAR).

Эксперименты выполняли в воздушной и гелиевой средах. Результаты приведены на рис. 17. В обоих случаях измерение проводилось при атмосферном давлении.

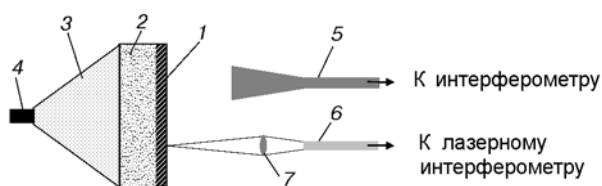


Рис. 16. Схема измерения скорости метания алюминиевой пластины:

1 — метаемая пластина, 2 — метаящий заряд, 3 — детонационная линза, 4 — электродетонатор, 5 — диэлектрический волновод с антенной, 6 — световод, 7 — линза

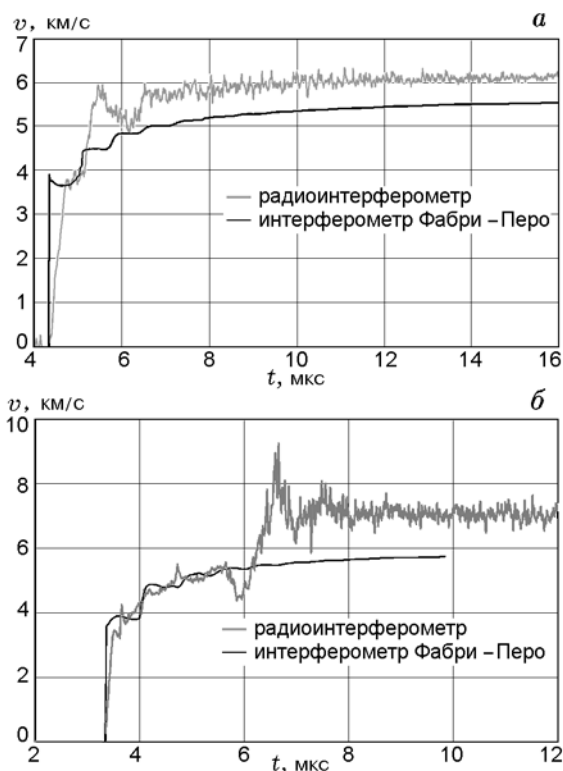


Рис. 17. v - t -Диаграмма движения пластины в воздухе, $p_0 = 1.0$ атм (а), и в гелии, $p_0 = 1.0$ атм (б)

Из рис. 17,а следует, что при метании пластины в воздухе при атмосферном давлении радиointерферометр с длиной волны $\lambda = 3.2$ мм регистрирует ее движение до скорости ≈ 3.5 км/с. При большей скорости, вследствие возникновения плазменного слоя перед лайнером, радиointерферометр начинает регистрировать движение фронта ударной волны в газе. В гелиевой среде (рис. 17,б) ионизация проявляется при скорости ≈ 5.5 км/с, что естествен-

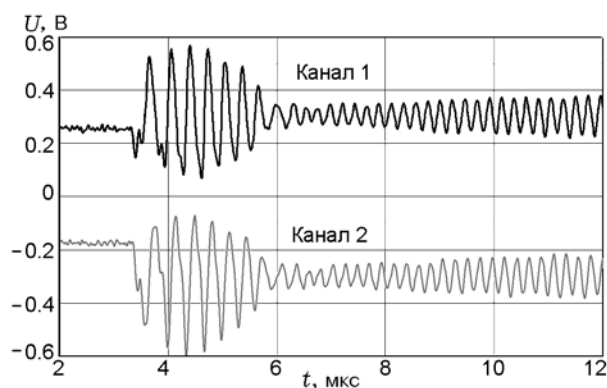


Рис. 18. Интерферограмма движения пластины в гелии, $p_0 = 1.0$ атм

но вследствие более высокого потенциала ионизации гелия.

Заметим, что сходная картина наблюдается и в разреженном воздухе ($p_0 < 10$ Торр), где радиointерферометр регистрирует полет лайнера до скорости ≈ 5.5 км/с, а затем присутствие даже малого количества воздуха оказывается достаточным для формирования ионизованного слоя, отражающего зондирующее излучение.

На рис. 18 показана интерферограмма движения пластины в гелии (график на рис. 17,б — результат ее обработки). Сравнение графиков показывает, что при $t > 5$ мкс амплитуда интерферограммы падает приблизительно в 10 раз, что свидетельствует о снижении отражательной способности зондируемой структуры. Если учесть, что в начале разгона пластины излучение отражалось от металла ($\Gamma \approx 1$), а при $t > 6.5$ мкс — от ионизованного гелия, то, считая перемещение пластины малым, получаем оценку коэффициента отражения от фронта ударной волны $\Gamma \approx 0.1$. Соответствующая этой величине оценка концентрации электронов дает значение $N_e \approx 1.4 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$.

Таким образом, радиointерферометр способен одновременно регистрировать не только кинематические параметры ударной волны в среде, но и ее ударно-волновую ионизацию, что дает дополнительную информацию об уравнении состояния среды (см. также [17]).

7. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНСТРУКЦИЙ

Иллюстрацию применения радиointерферометра миллиметрового диапазона для бесконтактной непрерывной диагностики динами-

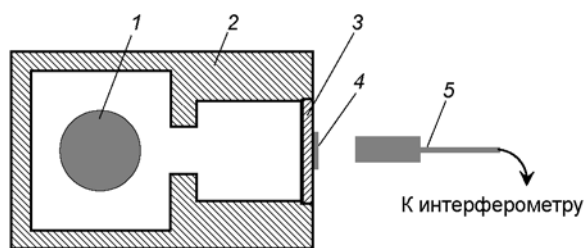


Рис. 19. Упрощенная схема измерения динамического отклика стенок ВЗК на внутреннее взрывное нагружение:

1 — нагружающий заряд ВВ, 2 — корпус ВЗК, 3 — крышка ВЗК, 4 — тензодатчик, 5 — диэлектрический волновод с антенно-фидерной системой

ческого отклика конструкций приведем на примерах исследования несущей способности взрыволокализирующей защитной камеры (ВЗК), предназначенной для многократных взрывных испытаний объектов, содержащих ВВ. С помощью радиоинтерферометра определялись упругие (и упругопластические) деформации стенок ВЗК по схеме, приведенной на рис. 19.

В эксперименте измерялся прогиб крышки ВЗК при помощи радиоинтерферометра и параллельно при помощи наклеенного на крышку тензодатчика. Результаты измерений приведены на рис. 20. При первом рассмотрении интерферограмма кажется неструктурированной и не поддающейся обработке, однако ее годограф имеет достаточно правильную форму, что позволяет построить кривую перемещения отражающей границы с достаточно высокой точностью.

Видно, что форма и длительность зависимостей достаточно хорошо совпадают. Однако на записи тензодатчика наблюдаются признаки его отклеивания и обрыва после прихода второй волны, в то время как радиоинтерферометр, являясь бесконтактным средством измерения перемещения отражающей границы, уверенно регистрирует прогиб крышки и последующий колебательный процесс. Отметим, что при длине волны 3.2 мм радиоинтерферометр уверенно зарегистрировал колебания с амплитудой ≈ 0.1 мм! Большая постоянная времени выходных цепей прибора позволила получить в некоторых опытах отчетливые записи поведения крышки длительностью до 1 с. В данной серии опытов радиоинтерферометр показал себя как надежное средство регистрации динамических процессов.

Достоинства радиоинтерферометрии для

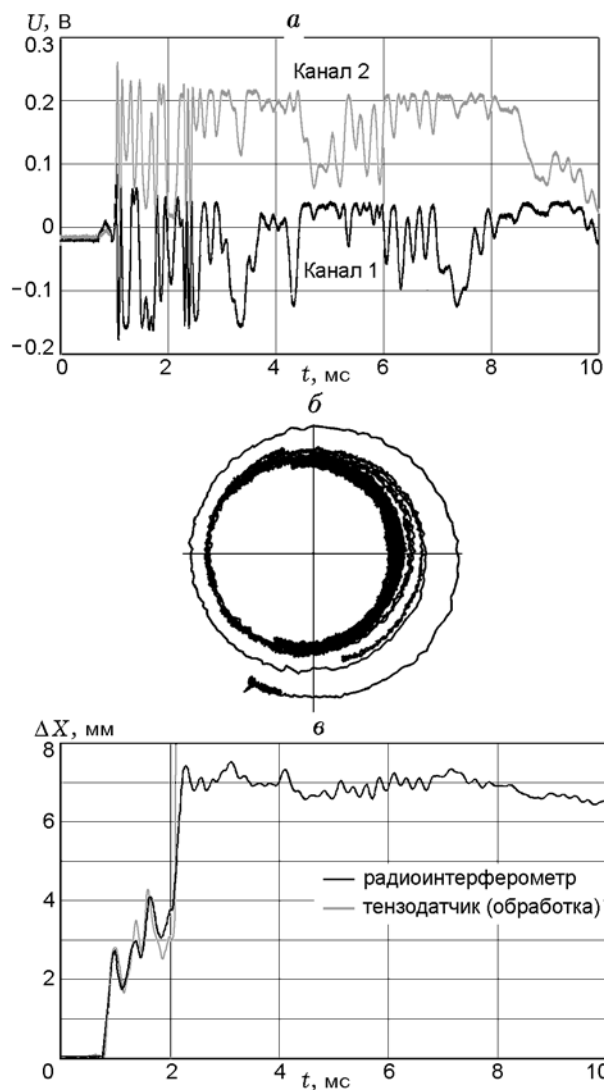


Рис. 20. Результаты измерения динамического отклика крышки ВЗК на внутреннее взрывное нагружение:

a — экспериментальная интерферограмма, *б* — годограф интерферограммы, *в* — результаты обработки

подобных приложений — простота и прецизионность — очевидны.

8. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СТВОЛЬНЫХ СИСТЕМ

Упрощенная схема проведения эксперимента показана на рис. 21.

Объектом исследования являлся взрывной ударный стенд с каналом ствола калибром 52 мм и длиной 300 мм. В экспериментах использовался ударник $\varnothing 52 \times 175$ мм массой 2.8 кг. Облучатель радиоинтерферометра

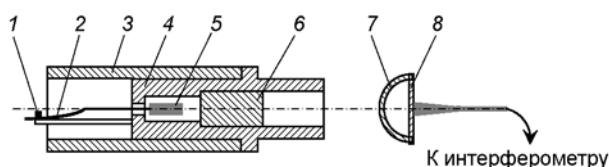


Рис. 21. Упрощенная схема проведения эксперимента:

1 — электродетонатор, 2 — лента из пластикового ВВ, 3 — защитная труба, 4 — пушка, 5 — заряд пластикового ВВ, 6 — ударник, 7 — полусферический обтекатель, 8 — опорная пластина для закрепления антенны

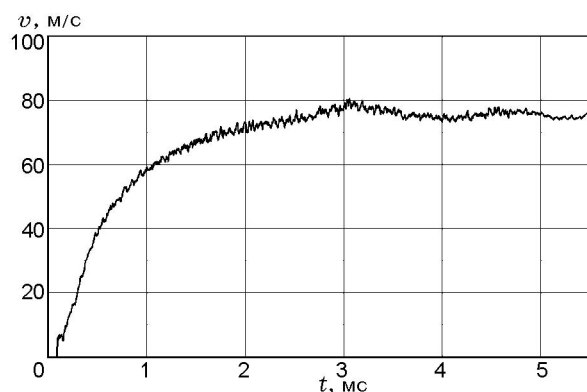


Рис. 22. Зависимость скорости ударника от времени

был расположен перед передним срезом ствола ускорительной системы за полусферическим обтекателем на расстоянии 300 мм.

Измеренная зависимость скорости ударника от времени приведена на рис. 22. Движение ударника зарегистрировано на длине 400 мм. На графике хорошо видны все основные фазы выстрела — реакция ударника на первичную ударную волну, его разгон с одновременным нарастанием собственных колебаний, истечение продуктов взрыва в атмосферу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершая краткое изложение результатов некоторых наших работ с применением перспективного инструмента — радиоинтерферометра миллиметрового диапазона для диагностики газодинамических процессов, подытожим видимые нам сегодня достоинства метода:

- отсутствие влияния на исследуемый процесс;

- непрерывность регистрации одновременно нескольких параметров (скорость де-

тонации, массовая скорость, диэлектрическая проницаемость среды и т. д.);

- широкий диапазон измеряемых скоростей (в наших исследованиях от 0.1 мм/с до 10 км/с с применением одной и той же аппаратуры);

- высокая точность измерения параметров движения ($\Delta X \approx 10 \div 50$ мкм, $\delta v \approx 1\%$);

- малая чувствительность к естественной шероховатости отражающих поверхностей;

- диагностика ударно-волновых и детонационных процессов внутри вещества;

- совместимость с другими методами;

- возможности диагностики химических и структурных превращений, ионизации вещества и т. п. в ударно-волновых условиях.

Работа выполнена в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ в творческом сотрудничестве с коллективами ФНПЦ НИИИС, г. Нижний Новгород (С. В. Катин, Ю. И. Орехов), ННГУ, г. Нижний Новгород (В. А. Канаков), МЭИ (ТУ), г. Москва (В. Ф. Взятых). Эксперименты с параллельной регистрацией метания лайнеров методами лазерной и микроволновой интерферометрии подготовлены и проведены совместно с сотрудниками лабораторий ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ под руководством В. А. Огородникова и А. В. Федорова. Диагностика динамического отклика взрывозащитных камер проводилась в экспериментах, подготовленных лабораторией ИФВ под руководством М. А. Сырунина. Измерения скорости ударника в канале ствола ВУС выполнены совместно с сотрудниками лаборатории ИФВ под руководством В. А. Пушкова.

Все коллегам, развивающим и способствующим внедрению методов микроволновой диагностики, авторы выражают свою благодарность.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Новейшие** исследования распространения радиоволн вдоль земной поверхности: сб. ст. / под ред. Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси. — М.: Л., 1945.
2. **Кох Б.** Физика быстропротекающих процессов / пер. под ред. Н. А. Златина. — М.: Мир, 1971. — Т. 1.
3. **McCall G. H., Bongianni W. L., Miranda G. A.** Microwave interferometer for shock wave, detonation and material motion measurements // Rev. Sci. Instrum. — 1985. — V. 56, N 8. — P. 1612–1618.

4. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — М.: Сов. радио, 1966. — Кн. 1.
5. Зарко В. Е., Вдовин Д. В., Перов В. В. Методические проблемы измерения скорости горения твердых топлив с использованием СВЧ-излучения // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 1. — С. 68–78.
6. Hermann M., Engel W., Eisenreich N. Thermal expansion, transitions, sensitivities and burning rates of HMX // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. — 1992. — V. 17. — P. 190–195.
7. Krall A. D., Glancy B. C., Sandusky H. W. Microwave interferometry of shock waves. 1. Unreacting porous media // J. Appl. Phys. — 1993. — V. 74, N 10. — P. 6322–6327.
8. Родионов А. В., Канаков В. А., Лупов С. Ю. Методы обработки результатов радиоинтерферометрических измерений параметров газодинамических процессов // Тр. междунар. конф. «VII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. — С. 680–685.
9. Luther G., Veaser L., Warthen B. A microwave interferometer to measure particle and shock velocities simultaneously // Shock Compression of Condensed Matter — 1991, Williamsburg, Virginia, June 17–20, 1991 / S. C. Schmidt, R. D. Dick, J. W. Forbs, D. G. Tasker (Eds). — Elsevier Sci. Publ. B. V., 1992. — P. 775–778.
10. Канаков В. А., Лупов С. Ю., Пархачев В. В., Родионов А. В. Многомодовая радиоинтерферометрия как средство увеличения числа определяемых параметров ВВ // Тр. междунар. конф. «IX Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. — С. 665–670.
11. Khanna R. K., Upadhyay S. K. Free space reflection type interferometric method for dielectric studies of sheet materials // Indian J. Phys. — 2000. — V. 74B, N 4. — P. 281–286.
12. Zhihong Ma, Seichi Okamura. Permittivity determination using amplitudes of transmission and reflection coefficients at microwave frequency // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. — 1999. — V. 47, N 5. — P. 546–550.
13. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / под ред. Р. Ф. Трунина. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
14. Электрические свойства полимеров / под ред. Б. И. Сажина. — 3-е изд., перераб. — Л.: Химия, 1986.
15. Родионов А. В., Бельский В. М., Богданов Е. Н., Михайлов А. Л., Комиссаров В. В., Седов А. А. Определение глубины возбуждения детонации радиоволновым методом в пластифицированных октогене и ТАТБ // Тр. междунар. конф. «XI Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. — С. 69–73.
16. Foltz M. F. Pressure dependence of the reaction rate of ТАТБ at high pressure // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. — 1993. — V. 18. — P. 210–216.
17. Богданов Е. Н., Бельский В. М., Родионов А. В. О влиянии ударносжатого воздуха перед метаемой пластиной на измерение скорости радиоинтерферометрическим методом // Тр. междунар. конф. «IX Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. — С. 680–686.

Поступила в редакцию 22/III 2011 г.