

На правах рукописи

Пархачёв Владимир Владимирович

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МНОГОМОДОВОЙ
РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИИ
В ДИАГНОСТИКЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

01.04.03 – Радиофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2009

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Канаков Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Ю.И. Орехов
кандидат физико-математических наук
А.Д. Мансфельд

Ведущая организация: Научно-исследовательский радиофизический
институт

Защита состоится «_____» _____ 200__ г. в _____ на засе-
дании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государст-
венном университете им. Н.И. Лобачевского (603950, Нижний Новгород,
пр. Гагарина, 23, корп. __, ауд. _____).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Ниже-
городского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим отрав-
лять по указанному адресу учёному секретарю совета.

Автореферат разослан «_____» _____ 200__ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент

Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

В настоящее время измерение параметров газодинамических процессов остаётся сложной научно-технической задачей. Существует целый ряд различных методов измерений – метод откола, оптический метод, метод лазерного измерения, магнитоэлектрический метод, пьезорезистивные и пьезоэлектрические методы, рентгенографический метод, радиоинтерферометрический метод и др. – среди которых очевидными преимуществами обладают бесконтактные или невозмущающие процесс. Ряд специфических проблем возникает при исследовании процессов, приводящих к разрушению исследуемого объекта, например, при исследовании ударных или детонационных явлений во взрывчатых веществах (ВВ). При промышленном изготовлении ВВ необходимо осуществлять контроль соответствия его параметров техническим условиям. Наиболее важным параметром процесса детонации является средняя скорость её распространения, а также разброс мгновенных значений этой скорости. Знание скорости ударной волны вместе с массовой скоростью сжатого вещества определяет уравнение состояния сжатого вещества. Общепринятый метод измерения скорости распространения ударных волн и детонации основан на применении контактных датчиков, устанавливаемых на тестируемом образце. Недостатками этого метода следует считать принципиальное присутствие возмущений, вносимых датчиками в объект исследования, а также измерение только средних значений скорости на интервалах между соседними датчиками. Причём увеличение плотности размещения датчиков влечёт усиление вносимых искажений. Достоинством контактного метода является высокая точность измерений, определяемая в основном погрешностью измерения расстояния между датчиками, которая может составлять доли процента.

Альтернативным методом измерения скорости детонации является радиоинтерферометрический метод, основанный на применении интерферометра, который через волновод облучает исследуемый объект электромагнитным колебанием известной формы и частоты. Отразившись от фронта горения, ударной или детонационной волны как от неоднородности, электромагнитная волна возвращается в прибор, где каким-либо образом детектируется. За счёт доплеровского сдвига частоты отражённой волны, появляется возможность детектировать частоту биений суммы опорного и отражённого сигналов. Очевидные преимущества интерферометрического метода заключаются в отсутствии вносимых возмущений в объект исследования и непрерывности получения информации о значениях мгновенной скорости зондируемого объекта, в том числе – нестационарного газодинамического процесса. Информативными параметрами интерферометрического метода, использующего электромагнитные колебания, могут являться фазовый сдвиг между падающей и отражённой или прошедшей

волнами, доплеровский сдвиг отраженной или прошедшей волны, резонансная частота системы и т.п. Многообразие параметров, содержащих информацию об исследуемом объекте, позволяет выбрать в каждом конкретном случае оптимальный параметр и таким образом обеспечить эффективное техническое решение.

В настоящее время не исследованным остаётся вопрос интерпретации экспериментальных данных зондирования волноведущих структур, поддерживающих многомодовый характер распространения электромагнитной энергии. Наиболее распространённая интерпретация, при которой методами фильтрации выделяется сигнал одной из мод, рассматривает сигналы остальных мод как помеху. В то же время, очевидно, что сигналы всех мод несут информацию о зондируемом объекте. Представляется актуальным разработать адекватную интерпретацию многомодовых сигналов.

Необходимым условием применимости метода является знание диэлектрической проницаемости (ϵ) среды распространения радиоволн, которая обычно измеряется независимыми методами. Наибольшую точность измерения ϵ удастся реализовать резонансным методом. Типичное значение абсолютной погрешности таких измерений составляет ± 0.01 , что обычно является вполне достаточным для большинства приложений. Однако погрешность определения ϵ может оказаться доминирующей в суммарной погрешности интерферометрического метода. В то же время, принципы многомодового зондирования допускают возможность извлечения из многомодового сигнала информации о нескольких параметрах зондируемого объекта, в том числе и о ϵ . Поэтому существует потребность в разработке методов извлечения информации о совокупности значений параметров из многомодового сигнала.

Основные цели диссертации

- анализ возможностей многомодовой радиоинтерферометрии с точки зрения получения одновременных оценок нескольких параметров исследуемого процесса;
- разработка методов анализа экспериментальных радиоинтерферометрических сигналов, полученных при исследовании газодинамических процессов в цилиндрических и прямоугольных образцах, а также в шашках ВВ;
- анализ потенциальной точности оценок параметров, получаемых при обработке многомодовых сигналов;
- исследование применимости многомодового метода для оценки флуктуирующих и нестационарных параметров.

Научная новизна

1. Обнаружена и обоснована дополнительная информативность многомодового радиоинтерферометрического метода по сравнению с одномодовым методом.
2. Выработаны оригинальные правила, устанавливающие формальную связь измеряемых параметров ВВ с регистрируемым сигналом. Эти правила учитывают многомодовый характер распространения зондирующего излучения в тонких диэлектрических цилиндрах, плоскопараллельных диэлектрических полосках и диэлектрических шашках диаметром, много превосходящим длину волны зондирующего излучения, а также возможность трансформации мод электромагнитного излучения при отражении от фронта газодинамического процесса.
3. Впервые предложено получать совместные оценки параметров исследуемых газодинамических процессов путём оптимизации параметров интерферограмм, рассчитанных по электродинамическим моделям, учитывающим многомодовый характер распространения радиоволн, методом максимального правдоподобия.
4. Метод оценки потенциальной точности измерений на основе взаимной корреляционной функции впервые применён для анализа потенциальной точности многомодовых интерферометрических измерений в газодинамических экспериментах.
5. Впервые радиоинтерферометрическим методом апостериори получена оценка флуктуаций скорости детонации и диэлектрической проницаемости исследуемого ВВ. Получение такой оценки возможно только при многомодовом зондировании.
6. Впервые предложена процедура анализа радиоинтерферометрических данных, позволившая при многомодовом зондировании получить оценку временной динамики мнимой части диэлектрической проницаемости ВВ за фронтом ударной волны.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в выявлении и обосновании высокой информативности многомодового интерферометрического метода, его высокой потенциальной точности при получении совместных оценок целого ряда параметров исследуемого процесса или вещества.

Практическая значимость работы состоит в разработанных процедурах получения различных одновременных оценок параметров стационарных и нестационарных газодинамических процессов, в экспериментальном подтверждении факта коррелированности скорости детонации с плотностью ВВ, и гипотезы об эволюции диэлектрической проницаемости сжатого ВВ за фронтом ударной волны. С помощью этих процедур на основании экспериментальных радиоинтерферометрических данных получены оригинальные оценки ряда параметров исследуемых процессов. Для таких параметров, как

скорость ударной и детонационной волн и диэлектрическая проницаемость ВВ полученные оценки хорошо совпали с данными независимых измерений. Также получен принципиально новый экспериментальный результат в виде произведения естественных среднеквадратичных отклонений скорости детонации и диэлектрической проницаемости ВВ.

Результаты работы могут применяться при разработке и проведении экспериментов по зондированию быстропротекающих процессов радиоинтерферометрическим методом.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод обработки данных радиоинтерферометрического зондирования тонких диэлектрических цилиндров ВВ в многомодовом режиме для получения одновременных оценок скорости детонации и диэлектрической проницаемости.
2. Алгоритм получения оценки произведения естественных среднеквадратичных отклонений скорости детонации и диэлектрической проницаемости ВВ.
3. Метод обработки данных радиоинтерферометрического зондирования плоскопараллельных диэлектрических полосок ВВ в многомодовом режиме для повышения точности оценки скорости детонации.
4. Метод обработки данных радиоинтерферометрического зондирования диэлектрических шашек ВВ диаметром, много превосходящим длину волны зондирующего излучения, для получения одновременных оценок скорости ударной волны, скорости детонационной волны, действительной части и динамики изменения мнимой части диэлектрической проницаемости сжатого вещества.

Внедрение научных результатов

Результаты данного исследования используются при обработке экспериментальных данных в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ. Они также внедрены в научно-исследовательских работах и учебном процессе в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского.

Апробация результатов и публикации

Обоснованность научных положений и выводов, полученных в диссертации, обеспечивается корректным применением методов статистической радиофизики, теории погрешностей и методов радиофизических измерений. Достоверность результатов подтверждается приведёнными теоретическими расчётами, результатами компьютерного моделирования и экспериментальными данными, в т.ч. полученными независимыми методиками.

Основные результаты диссертационной работы отражены в 13 научных публикациях, в том числе в 4 статьях в рецензируемых изданиях [1-4].

Результаты диссертационной работы представлялись на 9-й, 10-й и 11-й Научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, 2005, 2006, 2007) [7, 10, 13], XI и XII Нижегородских сессиях молодых учёных («Голубая Ока», 2005, 2006) [8, 9, 12], Пятой Всероссийской научно-технической конференции «Молодёжь в науке» (Саров, 2006) [11], Международной конференции «9 Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» (Саров, 2007) [5], XII Международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам «Megagauss-12» (Новосибирск, 2008) [6].

Личный вклад автора

Диссертант принимал непосредственное участие в постановке задач, построении физических моделей, расчётах, обсуждении и интерпретации результатов.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 105 наименований. Общий объём диссертации составляет 126 страниц, из них основной текст 115 страниц, библиографический список – 11 страниц. Работа содержит 30 рисунков и 3 блок-схемы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении излагаются состояние и актуальность предмета исследования, краткий обзор известных результатов по теме диссертации, цели и структура работы.

В первой главе описываются основные параметры газодинамических процессов и методы их измерения.

В первую очередь интересны такие параметры газодинамических процессов, как скорость ударных и детонационных волн, а также массовые скорости объектов. Указанные параметры можно измерять датчиками различной физической природы, помещаемыми в заряд ВВ. Все типы контактных методов обладают общим недостатком, связанным с влиянием датчика на изучаемый газодинамический процесс, что снижает точность измерений. Общим недостатком обладают и дискретные методы измерения параметров процесса. Эти методы позволяют получать оценки параметров процесса лишь в ограниченном множестве точек, не обеспечивая непрерывности получения информации. В связи с этим, можно заключить, что бесспорными преимуществами обладают бесконтактные и непрерывные методы. К таким методам относится интерферометрический метод.

Во второй главе излагаются основные принципы интерферометрических измерений, а также обсуждаются современные методы их реализации и

достигнутая точность. Делается вывод о перспективности многомодового подхода.

Важнейшей составляющей частью процедуры получения информации с помощью интерферометрических измерений является обработка полученного прибором сигнала – интерферограммы. Для вычисления скорости газодинамического процесса по мгновенной частоте интерферограммы необходимым является знание диэлектрической проницаемости среды распространения радиоволн (ϵ), которую обычно приходится измерять независимыми методами.

Типичная погрешность измерения скорости интерферометрическим методом обычно не превышает 1%. В стандартных методиках обработки экспериментальных данных рассматриваются узкополосные сигналы, состоящие из монохроматического колебания и аддитивного шума. В случае волноводного зондирования это обозначает рассмотрение одномодового режима. В случае же, когда отношение размеров зондируемого объекта и длины волны излучения не обеспечивает одномодовый режим, сигналы от старших мод считаются шумом, что существенно снижает точность и делает многие методы обработки сигналов принципиально неприменимыми. В то же время, не вызывает сомнения, что сигналы всех мод несут информацию о зондируемом объекте.

Для одновременного измерения скорости процесса и диэлектрической проницаемости среды, в которой этот процесс развивается, используется различие фазовых скоростей возбуждаемых мод зондирующей электромагнитной волны. При этом, как следует

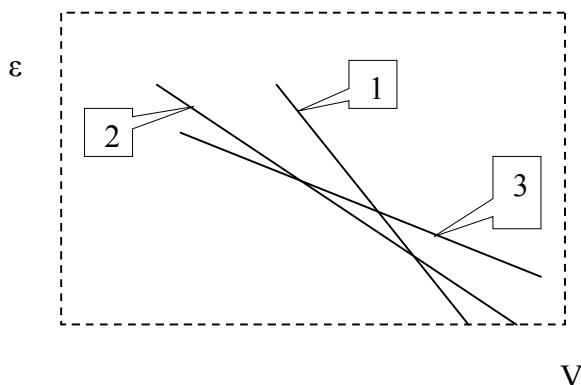


Рис. 1. Характеристические кривые

из характеристического уравнения волноведущей структуры, значение доплеровского сдвига частоты отражённой волны на каждой моде задаёт кривую на плоскости (ϵ , V). Поскольку для каждой моды этот сдвиг свой, на плоскости (ϵ , V) получается семейство кривых (1, 2 и 3 на рис. 1), в идеале пересекающихся в одной точке. Координаты точки пересечения будут соответствовать значениям оцениваемых параметров.

В случае если количество распространяющихся в структуре мод, а значит и количество кривых на плоскости (ϵ , V), больше двух, наличие шума в системе может привести к тому, что кривые пересекутся не в одной точке, а в некотором множестве попарных пересечений. В таком случае, для получения совместной оценки параметров можно использовать метод максимального правдоподобия. Как оказалось, этот метод обладает высокой потенциальной точностью измерений.

В третьей главе теоретически и на основании экспериментальных данных рассматривается вопрос интерферометрического исследования тонких диэлектрических стержней ВВ.

В эксперименте, проведённом в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ, зондировался круглый стержень ВВ диаметром 6 мм. Целью эксперимента являлась оценка скорости распространения детонации в исследуемом образце вещества. Схема эксперимента представлена на рис. 2. С правого торца через внешний фидер в стержень ВВ вводилось излучение от интерферометра. Стержень для этого излучения представлял собой круглый диэлектрический волновод. С противоположного торца в стержне с помощью электродетонатора (ЭД) возбуждалась детонация, которая распространялась по направлению к фидеру интерферометра и вызывала отражение зондирующего излучения. Помимо интерферометрических измерений в данном эксперименте производилось независимое измерение средней скорости детонации с помощью контактных датчиков. Результат предварительных измерений диэлектрической проницаемости – $\epsilon = 2.77 \pm 0.01$, а результат измерения средней скорости распространения детонации контактными датчиками – $V = 7818 \pm 41$ м/с. (Погрешность определения ϵ - 0.3%, V - 0.5%).

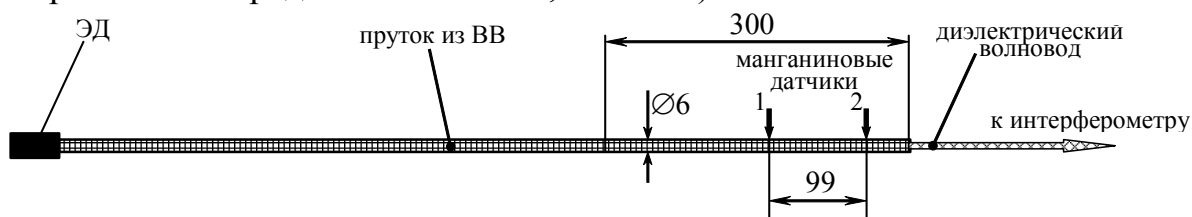


Рис. 2. Схема эксперимента со стержнем ВВ

Для данной постановки эксперимента была разработана электродинамическая модель, описывающая многомодовый характер распространения зондирующего излучения в стержне ВВ. Экспериментальный спектр (рис. 3, непрерывный график) был получен из оцифрованной интерферограммы.

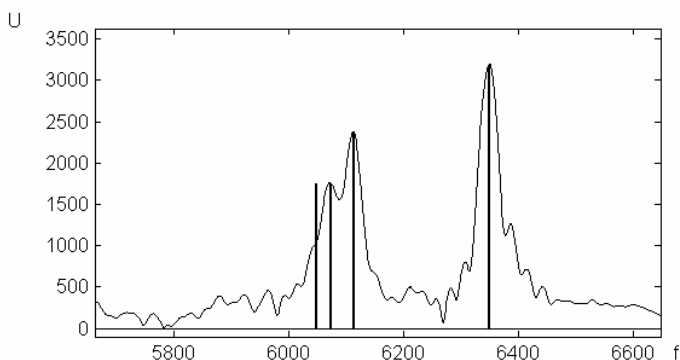


Рис. 3. Спектр интерферограммы

Теоретически рассчитанный спектр интерферограммы представлен на рис. 3 в виде четырёх дискретных компонент, частоты которых соответствуют четырём младшим модам, существующим в волноводе из ВВ, а относительные амплитуды соответствуют отношению максимумов спектральных амплитуд экспериментальной интерферограммы. За наиболее вероятную оценку параметров

по методу максимального правдоподобия следует взять такие их значения, когда корреляция экспериментального спектра и теоретически рассчитанного достигает максимума.

Было получено, что $\varepsilon = 2.71$, $V = 7922$ м/с, а дисперсия полученных оценок составила 0.001 и 0.14 м/сек соответственно. (Потенциальная точность составила около 0.03% для ε и величину меньше 0.01% для скорости).

Необходимо отметить, что полученные дисперсии учитывают только погрешность, вносимую в оценку белым гауссовым шумом, и не учитывают других факторов, влияющих на суммарную погрешность. Т.е. полученная оценка точности характеризует лишь потенциальную точность данного метода при свойственном данному интерферометру уровне шумов. Полученные же предложенным методом значения самих величин оказались существенно отличны от данных независимых измерений (около 1.5%), т.е. потенциальная точность не была достигнута.

Плотность исследуемого образца ВВ имеет небольшие флуктуации по объёму образца. Флуктуации плотности влекут за собой как флуктуации скорости детонации, так и флуктуации диэлектрической проницаемости вещества. Поскольку ε и V имеют функциональную связь с плотностью, они имеют и опосредованную функциональную связь друг с другом. Предложенный выше алгоритм обработки экспериментальных данных не позволил достичь потенциальной точности именно потому, что вследствие флуктуаций ε в стержне, и функциональной связи ε и V (при малых флуктуациях – линейной), среднее значение частоты интерферограммы оказывается смещённым относительно среднего значения, полученного без учёта флуктуаций.

Для конкретного экспериментального сигнала предположили, что показатель преломления вещества n имеет нормальное распределение со среднеквадратичным отклонением (СКО) σ_n и средним значением n_0 , среднее значение скорости V_0 и имеется линейная связь V и n с коэффициентом линейной связи k : $V = V_0 + k(n - n_0)$. Средние значения параметров V_0 и n_0 были положены равными данным независимых измерений. Далее было произведено моделирование поведения среднего значения частоты интерферограммы в зависимости от k и σ_n . Оптимальные значения k и σ_n находились путём минимизации невязки экспериментального и модельного спектров. Описанной процедурой определяется лишь произведение $k\sigma_n^2$ (или, что то же самое, $\sigma_v\sigma_n$). Минимум невязки имел место при $k\sigma_n^2 = 12.5$ м/с.

При этом модельный спектр соответствовал оценке $\varepsilon = 2.775$, $V = 7820$ м/с, что вполне согласуется с данными независимых измерений. Таким образом, знание средних значений параметров из независимых измерений позволило получить количественную оценку коррелированности скорости детонации и показателя преломления ВВ, что является принципиально новой информацией, полученной радиоинтерферометрическим методом.

Блок-схема процедуры обработки данных многомодового зондирования тонких стержней ВВ приведена в приложении 1.

В четвёртой главе теоретически и на основании экспериментальных данных рассматривается вопрос интерферометрического исследования плоскопараллельных диэлектрических полосок из ВВ.

Схема экспериментальной установки (вид сверху) изображена на рис. 4. Экспериментальные данные получены в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ. Целью проведения эксперимента было изучение поведения детонации в тонком слое. Для этого в плоском образце (линейке) ВВ толщиной 1 мм с одного торца возбуждалась детонация. С другого торца в слой осуществлялся ввод зондирующего излучения от интерферометра через прямоугольный диэлектрический волновод. Измеренная независимым методом диэлектрическая проницаемость ВВ составила 2.77 ± 0.01 . Использовался тот же интерферометр 3-х миллиметрового диапазона длин волн, что и в экспериментах по зондированию диэлектрических стержней. Для данной постановки эксперимента была разработана электродинамическая модель, описывающая многомодовый характер распространения зондирующего излучения в стержне ВВ.

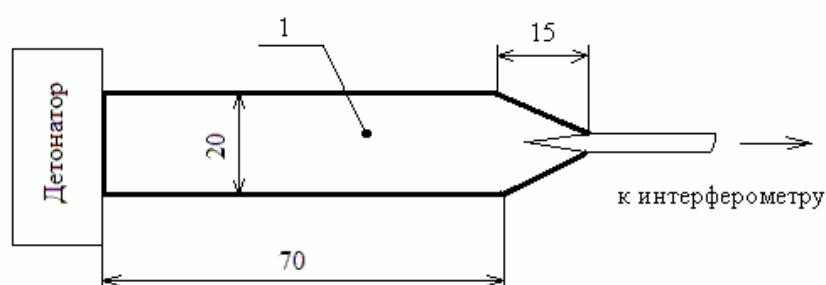


Рис. 4. Схема эксперимента с линейкой ВВ

Спектр интерферограммы позволил сделать вывод о многомодовом характере распространения зондирующего излучения в образце. Среднее значение скорости, полученное методом максимального правдоподобия при анализе многомодового режима, составило $V_{\text{сред.мод.}} = 7738$ м/с. Различие с оценкой, полученной без учёта многомодовости, составило около 0.8%, что довольно существенно не только в сравнении с потенциальной точностью многомодового метода 0.01%, но и в сравнении с погрешностью, вносимой неопределённостью ϵ , порядка 0.2%. Результаты многомодовой обработки являются физически более обоснованными.

Скорость распространения детонации в слое толщиной 1 мм по оценкам данной работы оказалась несколько ниже, чем скорость детонации в прутке из того же вещества диаметром 6 мм. Контактные датчики на прутке показали $V_{\text{сред.прут}} = 7818$ м/с. Различие с многомодовой оценкой в слое составило 1%. Возможным объяснением этого различия можно считать малую толщину слоя, близкую к предельной.

Процедура обработки экспериментальных данных зондирования тонкого слоя отличается от процедуры обработки данных зондирования тонких стержней электродинамической моделью, влияющей на характеристическое уравнение, правила выбора мод и связь частоты интерферограммы с измеряемыми параметрами.

В пятой главе теоретически и на основании экспериментальных данных рассматривается вопрос интерферометрического исследования диэлектрических шашек большого диаметра из ВВ.

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 5. Экспериментальные данные получены в ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ. Целью проведения эксперимента было изучение перехода ударной волны в процесс детонации в шашке ВВ. Для этого вспомогательным ВВ (1) разгонялась металлическая пластина (2), которая возбуждала ударную волну в исследуемом образце ВВ (3). Исследуемый образец представлял собой шашку диаметром 40 мм и толщиной 20 мм с известной диэлектрической проницаемостью. По оси симметрии шашки к ней был пристыкован диэлектрический волновод из фторопласта (4) сечением 1×2 мм. Через указанный волновод образец облучался электромагнитным колебанием из интерферометра, которое, претерпев отражение от фронта исследуемого процесса, частично возвращалось назад в прибор. Рабочая длина волны использованного интерферометра составляла 3.2 мм в вакууме.

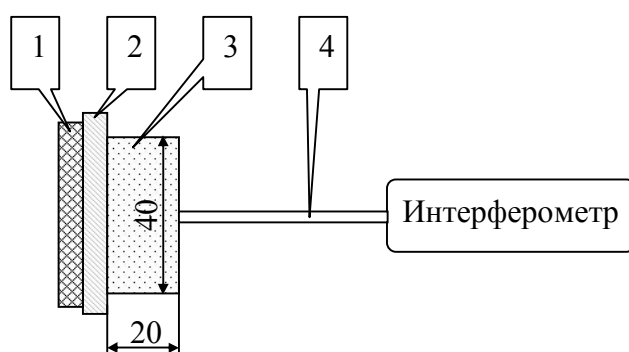


Рис. 5. Схема эксперимента с шашкой ВВ

Экспериментальная серия состояла из трёх экспериментов, отличающихся друг от друга энергией ударного воздействия. Была поставлена задача проанализировать запись интерферограммы и получить информацию о скоростях ударной и детонационной волн.

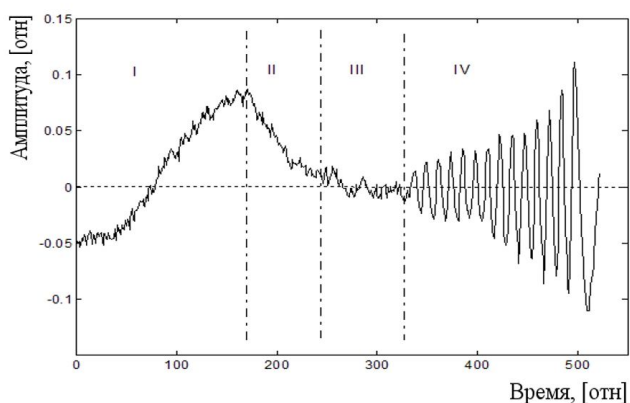


Рис. 6. Интерферограмма

Согласно ранее известному методу решения данной задачи интерферограмму во временной области необходимо разбить на два интервала. В течение первого интервала наблюдается сравнительно медленное движение металлического экрана и распространение плоского фронта ударной волны. Причём фронт ударной волны частично прозрачен для радиоизлучения, поэтому имеется возможность наблюдать

оба движения. Второй интервал интерферограммы содержит запись процесса детонации. Из-за высокой проводимости фронта детонационной волны наблюдать движение экрана уже не представляется возможным. Таким обра-

зом, на первом интервале интерферограммы сигнал должен иметь вид суммы двух возрастающих по амплитуде синусоид с частотами, соответствующими скоростям экрана и ударной волны. Возрастание по амплитуде связано с обратной пропорциональностью амплитуды сигнала и дальности зондирования. На втором интервале сигнал должен представлять собой просто синусоиду возрастающей амплитуды.

Экспериментальная интерферограмма (рис. 6) на начальном участке имела существенно более сложную форму, нежели предсказанную описанной выше моделью. Частоты доминирующих компонентов спектра сигнала на начальном участке, где детонация ещё не началась, находятся в сильном противоречии с априорными сведениями о скорости движения экрана и распространения ударной волны. Более того, мгновенная частота интерферограммы на этом этапе претерпевает существенные изменения, чего не должно быть в рамках упомянутой выше модели.

Между тем, визуальный анализ сигнала позволяет выделить на начальном этапе три секции (рис. 6, I-III) с различным поведением. Первая секция, не принимая во внимание высокочастотный шум, хорошо описывается суммой нескольких синусоид. Сигнал во второй секции демонстрирует явное экспоненциальное затухание. И в третьей секции, одновременно с продолжающимся трендом, можно заметить появление гармонической компоненты с частотой, более высокой, чем в первой секции. Причём характерная эволюция присутствовала во всех сигналах серии экспериментов. Четвёртая секция на рис. 6 соответствует процессу детонации.

Несоответствие сигнала простой модели, особенности его эволюции, а также априорные сведения о физической природе исследуемого явления, позволили сделать ряд предположений, объясняющих феномен. Слишком низкие (по априорным данным) частоты интерферограммы можно объяснить наличием отражения от границ раздела под острым углом. Диэлектрическая проницаемость материала за фронтом ударной волны всего на несколько процентов выше проницаемости невозмущённого вещества, поэтому в интерферограмме доминирует сигнал, отраженный от металлического экрана. Если предположить, что проводимость сжатого материала при переходе ударной волны в детонационную возрастает не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени, то затухание сигнала от экрана во второй секции получает своё объяснение. Одновременно с этим возрастает и отражение от фронта ударной волны, поэтому не заметный в первых двух секциях сигнал с частотой, соответствующей скорости ударной волны, отчётливо появляется в третьей секции.

Определение искомых параметров осуществлялось минимизацией невязки экспериментального и модельного сигналов. Полученная таким образом скорость ударной волны оказалась выше в тех экспериментах, где была выше интенсивность инициирующего ударного воздействия. При этом скорость детонации оказалась примерно равной во всех экспериментах. Такие результаты согласуются с теорией газодинамических процессов. Действительная часть показателя преломления сжатого вещества возросла на 0.03.

Мнимая часть показателя преломления невозмущённого ВВ была оценена в 0.01. Возрастание мнимой части показателя преломления считалось линейным во второй и третьей секциях. Во второй секции интерферограммы она возросла до 0.1, 0.05 и 0.15 в трёх экспериментах соответственно. В третьей секции рост продолжился до значений 1.5, 1, 0.35.

Соответственно сделанным предположениям, прежде чем ударная волна породит детонационную, мнимая часть показателя преломления возмущённого ударной волной вещества с некоторого момента начинает ускоренно возрастать. В серии проанализированных экспериментов переходный процесс занял от 0.4 мкс до 1.2 мкс, причём переходный процесс был тем быстрее, чем сильнее было инициирующее воздействие. Минимизацией невязки интерферограммы и модельного сигнала были получены оценки скоростей динамических процессов в образце и закона эволюции мнимой части показателя преломления. Моделирование показало, что мнимая часть показателя преломления сжатого вещества достигает значений порядка единицы ещё до начала процесса детонации.

Блок-схема процедуры обработки данных многомодового зондирования шашек ВВ приведена в приложении 2.

В заключении приводятся основные выводы и результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. На основе разработанных правил, устанавливающих формальную связь измеряемых параметров ВВ с регистрируемым сигналом и учитывающих многомодовый характер распространения зондирующего излучения в исследуемых структурах типа тонкий диэлектрический цилиндр, плоскопараллельная диэлектрическая полоска, диэлектрическая шашка, выработан метод получения совместных оценок параметров газодинамических процессов, в т.ч. нестационарных, путём оптимизации параметров расчётных интерферограмм по критерию максимального правдоподобия.
2. Получены соотношения для оценки потенциальной точности совместных оценок параметров на основании вычисления корреляционной функции модельной и экспериментальной интерферограмм. Установлена высокая потенциальная точность многомодового радиоинтерферометрического метода, превосходящая точность других методов.
3. Для указанных структур проведён анализ экспериментальных интерферограмм, получены оценки скорости ударной и детонационной волн, диэлектрической проницаемости исследуемого ВВ, а также потенциальной точности измерений указанных параметров. Потенциальная точность составила около 0.03% для ϵ и величину меньше 0.01% для скорости.
4. Впервые получена совместная оценка флуктуаций скорости детонации и диэлектрической проницаемости исследуемого ВВ в тонком диэлектрическом стержне. Данная оценка получена с помощью методов многомодовой радиоинтерферометрии, при этом учёт корреляции флуктуаций измеряемых

параметров помог существенно увеличить точность интерферометрических оценок. С одной стороны, факты корреляции диэлектрической проницаемости с плотностью вещества, а также скорости детонации с плотностью вещества хорошо известны, с другой стороны, другие известные экспериментальные методы не позволяют непосредственно получать количественные оценки связи скорости детонации с диэлектрической проницаемостью. Наличие таких оценок чрезвычайно важно в приложении к радиоинтерферометрическим методам исследования процесса детонации.

5. Методом многомодовой радиоинтерферометрии получена оценка временной динамики мнимой части диэлектрической проницаемости исследуемого ВВ за фронтом ударной волны в диэлектрической шашке. Установлено, что прежде чем ударная волна породит детонационную, мнимая часть показателя преломления возмущённого ударной волной вещества с некоторого момента начинает ускоренно возрастать и достигает значений порядка единицы ещё до начала процесса детонации.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Из списка изданий, рекомендованных ВАК:

1. Пархачёв В.В. Оценка параметров быстропротекающих процессов в диэлектрических структурах путём многомодового зондирования // «Вестник ННГУ. Серия радиофизика.» вып.1(3), 2005 г. С. 33-39.
2. Канаков В.А., Пархачёв В.В., Родионов А.В. Обработка данных миллиметровой многомодовой радиоинтерферометрии детонации плоского слоя // «Вестник ННГУ». 2008 г. №4. С. 49-52.
3. Канаков В.А., Пархачёв В.В. Лучевой подход к обработке данных миллиметровой радиоинтерферометрии газодинамических процессов в шашке // «Вестник ННГУ». 2009 г. №2. С. 71-75.
4. Канаков В.А., Пархачёв В.В. Анализ данных КВЧ зондирования динамических процессов в сверхразмерных образцах // «Физика волновых процессов и радиотехнические системы», 2009 г. №2. С. 22-26.

Международные конференции:

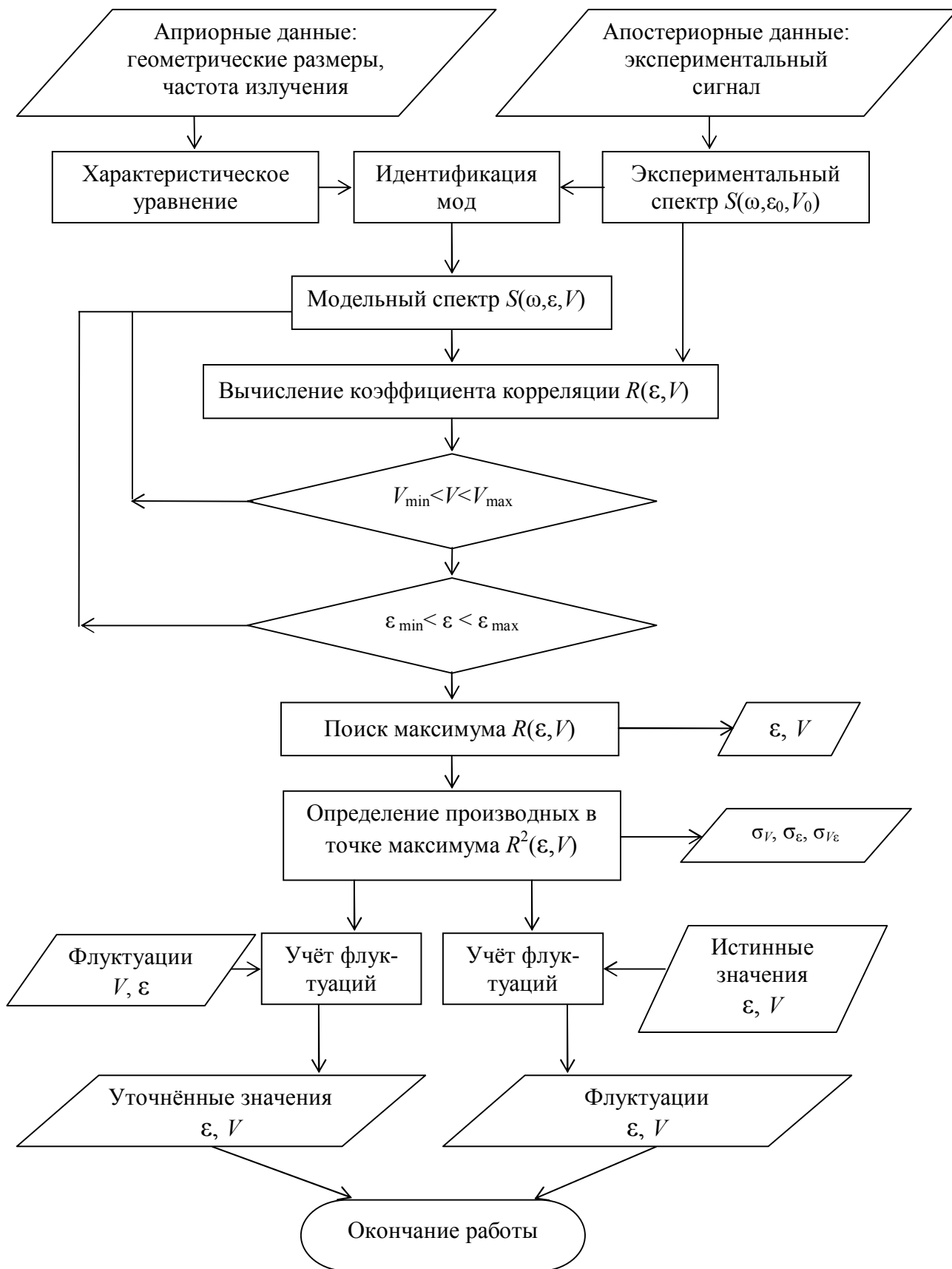
5. Канаков В.А., Лупов С.Ю., Пархачёв В.В., Родионов А.В. Многомодовая радиоинтерферометрия как средство увеличения числа определяемых параметров ВВ // Труды междунар. конф. «9 Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». 12-16 марта 2007. Саров. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2007. С. 665-670.
6. Канаков В.А., Пархачёв В.В. Обработка данных активного КВЧ зондирования динамических процессов в диэлектрических цилиндрах // Тезисы докладов XII Международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам «MEGAGAUSS XII», 2008 г. С. 129.

Прочие издания:

7. Канаков В.А., Пархачёв В.В., Родионов А.В. Оценка параметров ВВ путём зондирования детонирующего диэлектрического волновода // IX Научная конференция по радиофизике «Факультет – ровесник Победы». Тезисы докладов. 2005. Н. Новгород, ННГУ. С. 105-106.
8. Канаков В.А., Пархачёв В.В. Измерение корреляционной связи между скоростью процесса детонации в веществе и его диэлектрической проницаемостью // XI Нижегородская сессия молодых учёных. Естественнонаучные дисциплины. Тезисы докладов. 2006 г. С. 42-43.
9. Канаков В.А., Пархачёв В.В. Повышение точности измерения параметров взрывчатого вещества за счёт учёта их флуктуаций и взаимной корреляции // XI Нижегородская сессия молодых учёных. Математические науки. Тезисы докладов. 2006 г. С. 49-50.
10. Пархачёв В.В. Установление взаимной зависимости параметров взрывчатого вещества // X Научная конференция по радиофизике. Тезисы докладов. 2006. Н. Новгород, ННГУ. С. 13.
11. Пархачёв В.В. Методы микроволновой многомодовой интерферометрии быстропротекающих газодинамических процессов // Сборник докладов Пятой Всероссийской научно-технической конференции «Молодёжь в науке». 1-3 ноября 2006. Саров. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2007 г. С. 311-315.
12. Канаков В.А., Пархачёв В.В. Модовый состав интерферометрического сигнала, полученного при зондировании процесса детонации // XII Нижегородская сессия молодых учёных. Естественнонаучные дисциплины. Тезисы докладов. 2007 г. С. 67-68.
13. Пархачёв В.В. Межмодовые переходы при многомодовой радиоинтерферометрии процесса детонации // XI Научная конференция по радиофизике. Тезисы докладов. 2007. Н. Новгород, ННГУ. С. 95-96.

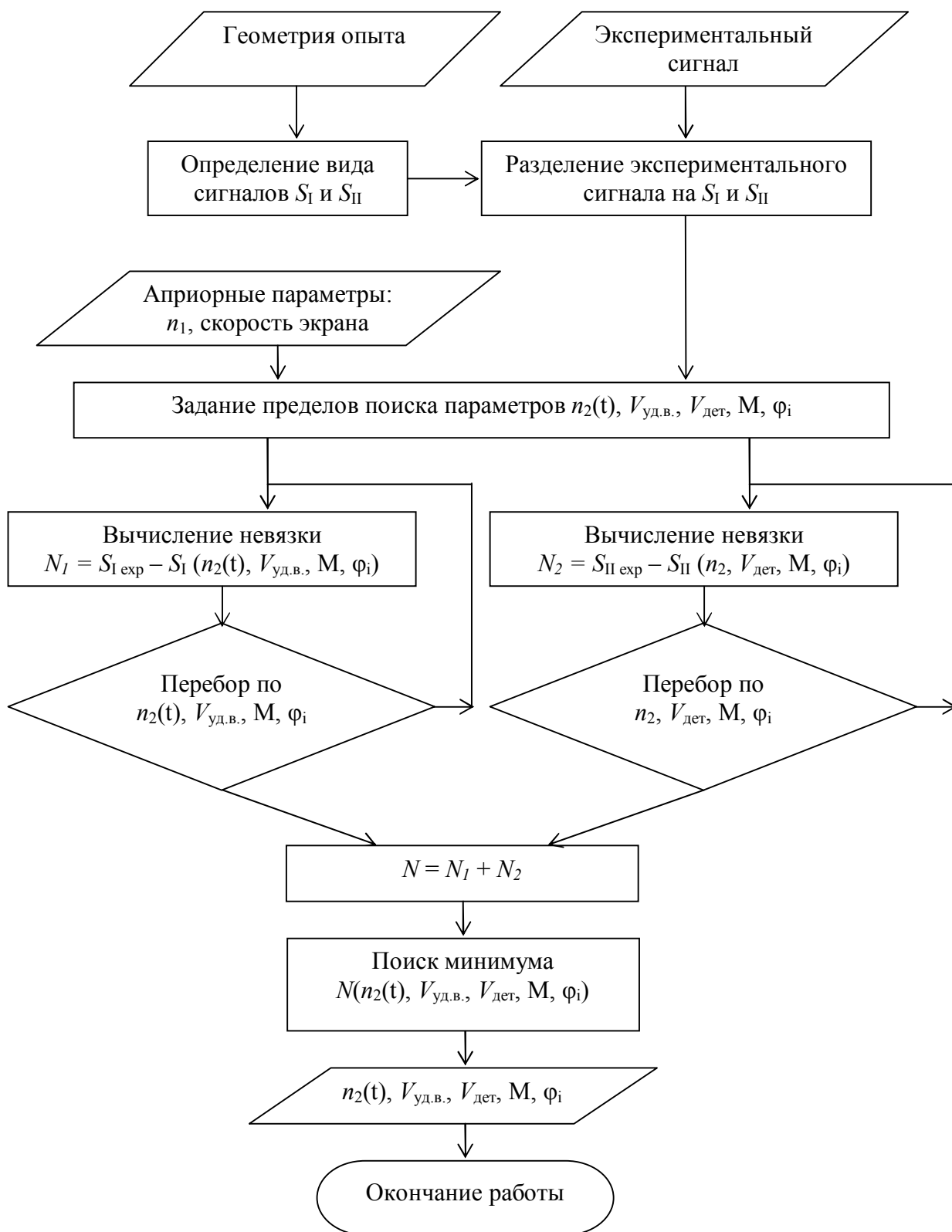
Приложение 1

Блок-схема процедуры обработки данных зондирования тонких стержней ВВ



Приложение 2

Блок-схема процедуры обработки данных зондирования шашек ВВ



ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

1. Основные параметры газодинамических процессов и методы их измерения
2. Интерферометрические методы измерения параметров газодинамических процессов

- 2.1. Принципы микроволновой интерферометрии
- 2.2. Техника и точность интерферометрических измерений. Обзор современного состояния вопроса
- 2.3. Многомодовая интерферометрия газодинамических процессов в мм диапазоне

3. Измерение скорости детонации и сопутствующих параметров в тонких диэлектрических цилиндрах ВВ

- 3.1. Цели исследования и постановка эксперимента
- 3.2. Метод обработки данных, полученных при многомодовом зондировании тонких диэлектрических цилиндров ВВ
Шаг 1. Электродинамическая модель
Шаг 2. Оптимизация параметров
Шаг 3. Оценка потенциальной точности
Шаг 4. Учёт коррелированных флуктуаций параметров
Блок-схема процедуры анализа данных при зондировании стержней ВВ

- 3.3. Обработка экспериментальных данных, полученных при зондировании тонких диэлектрических цилиндров ВВ

4. Измерение скорости распространения детонации в плоскопараллельных диэлектрических полосках ВВ

- 4.1. Цели исследования и постановка эксперимента
- 4.2. Метод обработки данных, полученных при многомодовом зондировании плоскопараллельных образцов ВВ
Шаг 1. Электродинамическая модель
Шаг 2. Оптимизация параметров
Шаг 3. Оценка потенциальной точности
Блок-схема процедуры анализа данных при зондировании полосок ВВ

- 4.3. Обработка экспериментальных данных, полученных при зондировании плоскопараллельных образцов ВВ

5. Измерение параметров газодинамических процессов в шашках ВВ

- 5.1. Цели исследования и постановка эксперимента
- 5.2. Метод обработки данных, полученных при многолучевом зондировании диэлектрических шашек ВВ
Шаг 1. Электродинамическая модель
Шаг 2. Учёт нестационарности
Шаг 3. Оптимизация параметров
Блок-схема процедуры анализа данных при зондировании шашек ВВ

- 5.3. Обработка экспериментальных данных, полученных при зондировании шашек ВВ

Заключение

Литература

Подписано в печать __. __. 2009. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии
Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
Лиц. ПД № 18-0099 от 14.05.2001 г.
603000, Н.Новгород, ул. Б. Покровская, 37