

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И.ЛЕНИНА

На правах рукописи

Для служебного пользования

Экз. № 97

ЧУБАРОВ Сергей Ильич

УДК 621.378.525.532.57

МЕТОД ЛАЗЕРНОЙ АНЕМОМЕТРИИ МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ  
ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА

01.04.04 - физическая электроника, включая квантовую

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

МННСК 1988

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко Белорусского ордена Трудового Красного Знамени университета имени В.И.Ленина

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор И.А.МАЛЕВИЧ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Ю.Е.ПОЛЬСКИЙ  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник А.К.ЯКУШЕВ

Ведущая организация: Государственный оптический институт имени С.И.Вавилова

Защита состоится " " 1988г. в часов на заседании специализированного Совета К 056.03.01 по присуждению ученой степени кандидата наук в Белорусском ордена Трудового Красного Знамени государственном университете имени В.И.Ленина по адресу: 220080, г.Минск, Ленинский проспект, 4, главный корпус, комн. 206.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белгосуниверситета имени В.И.Ленина.

Автореферат разослан " " 1988 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
к.ф.-м.н., доцент

А.В.ЧАЛЕЙ

Актуальность проблемы. Актуальность развития метода лазерного измерения скорости особенно отчетливо проявляется в задачах, где необходимо изучать быстропеременные и маломасштабные явления, происходящие в многофазных потоках. Наибольшие перспективы, в силу высокой потенциальной эффективности, имеют лазерные измерители скорости, основанные на использовании эффекта Доплера.

Однако, высокие потенциальные возможности метода лазерного доплеровского измерения скорости до настоящего времени не реализованы полностью. Это связано с тем, что не решены задачи разработки методов обработки доплеровских сигналов, позволяющих с высокой точностью вести регистрацию и измерение параметров оптических сигналов с интенсивностью от режима одночастичного сигнала до аналогового квазинепрерывного сигнала, что позволило бы решать комплексно задачи аэро-, гидродинамики, тепло- и массообмена по изучению потоков с вариациями рассеивающих центров, с различной турбулентностью с высоким пространственно-временным разрешением. Существенно также и то, что до настоящего времени в отечественных и зарубежных научно-технических публикациях не отражены вопросы создания средств контроля рабочих параметров доплеровских анемометров. Создание средств диагностики и контроля рабочих параметров анемометров позволило бы осуществить метрологию метода и сравнение результатов, полученных на различных оптических схемах лазерных анемометров.

Решение данных задач требует разработки новых методов измерения быстропотекающих оптических процессов, содержащих доплеровские компоненты, на основе многоканального временного анализа и разработки приборов автоматического контроля параметров лазерных доплеровских систем, а также создания универсальных, для широкого круга задач, лазерных доплеровских измерителей скорости с высоким временным и пространственным разрешением. Все это подтверждает актуальность диссертационной работы.

Диссертация является самостоятельной, законченной частью общей проблемы разработки методов и создания лазерных средств анализа быстропотекающих оптических процессов и явлений с высоким пространственно-временным разрешением, разрабатываемой в НИИ прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко Белгосуниверситета им. В.И.Ленина по заданиям Всесоюзной комплексной программы 0.80.03(06.30.А), а также комплексной Всесоюзной програм-

ме Минвуза СССР "Лазеры-2".

Целью работы является дальнейшее совершенствование и разработка метода построения лазерных доплеровских анемометров (ЛДА) на основе многоканального временного анализа информационного сигнала, обеспечивающего получение высокого пространственно-временного разрешения при анализе доплеровских сигналов в широком диапазоне скоростей исследуемых многофазных потоков при различной плотности рассеивающих центров, а также исследование и разработка методов построения систем контроля рабочих параметров ЛДА с широкими функциональными возможностями.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- С учетом тенденций и принципов структурного построения ЛДА провести численное моделирование информационных процессов ЛДА, оценить вид функции распределения периодов доплеровского сигнала в условиях значительного изменения его частоты, интенсивности и на базе этого синтезировать структурную модель ЛДА временного типа.

- Разработать метод построения и создать экспериментальные образцы ЛДА на основе многоканального временного анализа доплеровского сигнала с высоким пространственно-временным разрешением для анализа многофазных потоков.

- Разработать систему высокоточных оптоэлектронных устройств амплитудного и временного анализа сигналов ЛДА и экспериментально исследовать их предельные возможности.

- Разработать методы аппаратного анализа и контроля рабочих параметров ЛДА, включая метод диагностики интерференционной картины измерительного объема анемометра, контроля распределения мощности лазерных пучков и метода контроля оптических потерь в элементах ЛДА и на их основе создать ряд устройств диагностики рабочих параметров ЛДА непосредственно в рабочем цикле анемометра.

- Экспериментально, на основе созданных ЛДА временного типа, в задачах измерения профилей скорости многофазных потоков, провести измерения распределения скоростей в различных сечениях жидкостных и газовых потоков, определить степень турбулентности исследуемых потоков и оценить границы применимости метода.

## Научная новизна работы.

1. Предложен метод анализа доплеровского сигнала, основанный на формировании и анализе временного аналога исследуемого сигнала, позволяющий осуществлять анализ доплеровских сигналов в широком частотном диапазоне при значительных флуктуациях его интенсивности; методом численного моделирования оценен вид функции распределения периодов сформированного временного аналога доплеровского сигнала; определено оптимальное значение величины порога временной дискретизации и вида функции отслеживания порога, минимизирующее погрешности преобразования доплеровского процесса в его временной аналог; показана эффективность построения ЛДА на основе многоканального временного анализа.

2. Предложена и обоснована структурная модель ЛДА на основе многоканального временного анализа доплеровского процесса, удовлетворяющая требованиям получения высокой точности измерения доплеровских процессов различной интенсивности в широком частотном динамическом диапазоне и характеризующаяся наличием в структуре ЛДА устройства формирования временного аналога доплеровского процесса, устройства прецизионного многоканального временного анализа реализаций доплеровского сигнала, а также введением в структуру ЛДА, как основных элементов, обеспечивающих высокое разрешение, элементов метрологической аттестации параметров оптического и электрического трактов ЛДА.

3. Предложен метод построения ЛДА с временной обработкой доплеровского сигнала, основанный на многоканальном анализе вероятностной структуры временных флуктуаций частоты доплеровского сигнала, позволяющий исследовать флуктуации периодов сигнала ЛДА при длине реализации  $T + 512$  пересечений порогового уровня от потоков с различной степенью турбулентности и концентрацией рассеивающих центров; предложены принципы построения измерительно-вычислительных устройств ЛДА - источников опорных колебаний и временных шкал ЛДА, быстродействующего двухшкального аналого-цифрового преобразователя, многоканальных анализаторов статистических распределений интервалов времени; создан ряд экспериментальных образцов ЛДА временного типа.

4. Предложены методы метрологической аттестации основных параметров ЛДА и созданы экспериментальные образцы устройств аттестации: анализатор пространственной частоты интерференционной картины измерительного объема, многоканальный оптический анализатор для определения параметров пространственно-энергетических распределений в интерферирующих пучках и полного профиля интенсивности в измерительном объеме, автоматические устройства определения коэффициентов оптических потерь в элементах ЛДА.

Практическая значимость работы. При непосредственном участии и под руководством автора разработан и создан ряд экспериментальных образцов ЛДА временного типа, а также устройства контроля рабочих параметров разработанных анемометров. Разработанные ЛДА позволяют вести анализ доплеровских сигналов от широкого класса исследуемых потоков, являются более эффективными по точности, быстродействию и пространственному разрешению по сравнению с известными.

В силу широких функциональных возможностей разработанных устройств и систем, они нашли широкое применение в ряде приложений физической электроники, включая аппаратуру диагностики и контроля параметров оптических изображений и пространственного распределения мощности в исследуемых световых пучках, в спектрометре для нелинейной спектрофотометрии и устройстве для определения остроты зрения - лазерном ретинометре (рассмотрение данных устройств проведено в приложении).

#### Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработанный метод анализа и алгоритмы измерения параметров доплеровских сигналов на основе единого подхода многоканального временного анализа, позволивший, в отличие от известных, исследовать с высоким временным разрешением вероятностную структуру флуктуаций доплеровского сигнала в условиях значительного изменения его интенсивности и частоты.

2. Структурная модель и метод построения ЛДА, основанный на формировании временного аналога исследуемого доплеровского процесса, позволивший на основе метода следящего порога компенсировать погрешности, обусловленные случайным характером амплитудной модуляции доплеровского процесса, и после-

дующим многоканальным анализом ансамбля реализаций временного аналога доплеровских сигналов с субнаносекундным разрешением.

3. Разработанные методы анализа и комплекс аппаратуры для определения метрологических характеристик ЛДА, позволившие экспериментально оценить погрешности ЛДА, обусловленные зависимостью периода интерференционной картины от координат измерительного объема, видом функции пространственного распределения мощности в интерферирующих пучках, потерями в элементах ЛДА, а также результаты изучения его предельных точностных характеристик.

4. Созданные экспериментальные образцы ЛДА временного типа для исследования как жидкостных, так и газовых струевых многофазных потоков с различной степенью турбулентности, в которых реализованы предложенные принципы повышения точности временного анализа доплеровского сигнала, позволившие проводить анализ доплеровских сигналов в динамическом диапазоне скоростей до 60 дБ с высоким временным разрешением ( $\sim 5 \cdot 10^{-10}$  с) как от потоков с низкой концентрацией рассеивающих центров, так и высокой.

5. Результаты экспериментального исследования метрологических характеристик ЛДА и профилирования ряда многофазных потоков на разработанных анемометрах временного типа, которые подтвердили высокую эффективность метода и разработанных устройств лазерной анемометрии.

Внедрения. Результаты работы в виде разработанных устройств внедрены в ГОИ им.С.И.Вавилова, п/я В-8603, ИТМО АН ВССР, Бел.НИИ переливания крови г.Минск, 4-ой клинической больнице г.Минск, НИИ ПП им.А.Н.Севченко Белгосуниверситета им.В.И.Ленина.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на: Всесоюзной конференции "Формирование оптического изображения и методы его коррекции" 1979 г., г.Могилев; на Всесоюзном совещании "Оптические сканирующие устройства и измерительные приборы на их основе" (Барнаул, 1980); на Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы повышения эффективности и качества систем синхронизации" (г.Горький, 1979 г.); на Всесоюзной научно-технической конференции "Радиотехнические измерения в диапазоне высоких частот (ВЧ) и сверхвысоких частот (СВЧ) (г.Новосибирск, 1980г.);

на Всесоюзной научно-технической школе-семинаре "Лазерное оптическое и спектральное приборостроение" (г. Минск, 1983, 1986 гг.); на 2 Всесоюзной научно-технической конференции "Применение лазеров в технологии и системах передачи и обработки информации" (г. Ленинград, 1984г.); на 12 Всесоюзной научно-технической конференции "Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстропротекающих процессов" (г. Москва, 1985г.); на Республиканской научно-технической конференции "Проблемы применения современных радиофизических методов для повышения эффективности производства и автоматизации исследований" (г. Минск, 1981г.); на Республиканской научно-технической конференции "Проблемы создания и применения в народном хозяйстве лазерной и оптоэлектронной техники" (г. Минск, 1982г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 20 работ, в том числе 3 авторских свидетельства СССР.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений. Общий объем работы 188 страниц. Она содержит 125 страниц основного текста, 59 рисунков, 4 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы, кратко освещено современное состояние проблемы, определены цели и задачи диссертационной работы. Сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен теоретический анализ математических моделей оценивания доплеровских сигналов. На основе анализа и численного моделирования информационных процессов в ДДА предложен метод определения параметров доплеровского сигнала, основанный на формировании временного аналога исследуемого доплеровского процесса и последующим многоканальным временным анализом сформированного сигнала.

Показано, что для реальных сигналов ДДА наличие существенной амплитудной модуляции интенсивности и шума приводят к флуктуациям временного "портрета" доплеровского информационного сигнала в исследуемой реализации. В связи с этим выбор величины порога временной дискретизации процесса и его вид существенно влияют на точность измерения. В процессе моделирования выходной результирующий сигнал ДДА после низкочастотной фильтрации описывался в виде



$$x(t) = \sum_{n=1}^N A_n W(t-t_n) \cos[\omega_0(t-t_n)] \quad (1)$$

где  $t_n$  - момент вхождения  $n$ -ой частицы в измерительный объем;  $N$  - число частиц в объеме,  $W(t-t_n)$  - характеристика измерительного объема,  $A_n$  - случайная амплитуда. Моделирование доплеровского сигнала осуществлено для двух оптических систем: системы с маской и системы с гауссовскими пучками. Численные модели проанализированы для двух законов распределения влета частиц в измерительный объем: гауссовского и пуассоновского. Среднее значение доплеровского периода определялось в виде  $T_{cp} = \sum_{i=1}^N T_i / N$ , а величина ошибки преобразования  $\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N (T_i - T_{cp})^2} / (N-1) / T_{cp}$

Определена зависимость  $\Delta$  от числа интерференционных полос, числа частиц в измерительном объеме при  $U_0 = A_m / \langle A^2 \rangle^{1/2} = 0$  где  $\langle A^2 \rangle$  - средний квадрат огибающей,  $A_m$  - величина порогового уровня, а также от величины  $U_n$ . Установлено в результате численного моделирования, что  $\Delta$  имеет существенную зависимость от величины порога  $U_n$  (рис. I "а").

Для уменьшения этого влияния предложен способ формирования временного аналога доплеровского сигнала на основе следящего порога дискриминатора. При этом показано, что для минимизации погрешности формирования временного аналога доплеровского сигнала вид функции отслеживания порога должен полностью определяться видом огибающей доплеровского процесса, рис. I "б".

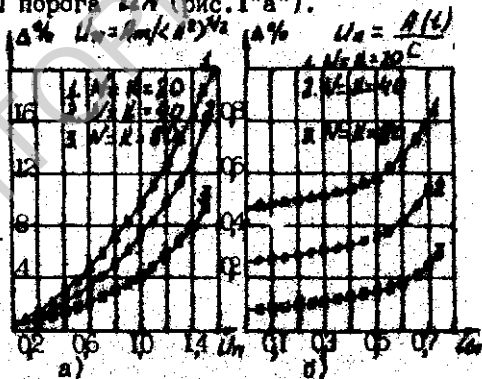


Рис. I. Зависимость ошибки преобразования  
а) от величины постоянного порога  
б) для системы со следящим порогом.

На основе результатов анализа и рекомендаций численного моделирования процессов формирования доплеровских сигналов типовых экспериментальных ситуаций синтезирована обобщенная структурная модель ЛДА на основе многоканального временного анализа доплеровских сигналов для различных потоков, удовлетворяющая требованиям получения высокой точности измерения

доплеровских компонент в широком частотном диапазоне. Разработанная модель характеризуется наличием в структуре ЛДА устройств формирования временного аналога доплеровского процесса с автоматическим выбором пороговых уровней дискретизации и селективируемых зон анализа реализаций доплеровского сигнала, устройств прецизионного многоканального временного анализа. Показана необходимость введения в структурную модель ЛДА, как основных рабочих элементов, устройств метрологической аттестации параметров оптического и электрического трактов ЛДА.

Для реализации разработанной структурной модели предложена модифицированная оптическая схема ЛДА с дифференциальным принципом формирования измерительного объема и тремя акусто-оптическими модуляторами (АОМ). Предложенная и реализованная оптическая схема ЛДА временного типа позволила осуществить перенос доплеровского сигнала в требуемую спектральную (временную) область как высоких, так и низких частот. Наличие в АОМ области плавной перестройки по частоте без нарушения условия дифракции позволило реализовать режим сжатия выходного частотного диапазона доплеровского сигнала путем изменения масштабного коэффициента оптической схемы  $\sin \alpha$ . Предложено частоту накачки АОМ задавать источником опорных колебаний с плавной перестройкой периода  $/T/$  для стабилизации частоты доплеровского сигнала в определенном спектральном диапазоне, что позволило реализовать измерения скоростей в диапазоне 0,1-150 м/с.

Вторая глава посвящена разработке методов анализа оптических трактов в ЛДА и исследованию характеристик разработанной аппаратуры контроля параметров интерференционной картины измерительного объема ЛДА, диагностики лазерного излучения и контроля оптических потерь элементов ЛДА.

Рассмотрена сущность предложенного метода контроля, заключающаяся в экспериментальном определении, в процессе реального эксперимента, набора рабочих параметров ЛДА, от которых зависят его предельные характеристики, с последующим автоматическим учетом полученных данных и коррекцией на этой основе результатов измерений. Показано, что с точки зрения повышения точности, разрешающей способности и динамического диапазона ЛДА необходим контроль пространственной частоты интерференци-

онной картины измерительного объема, функции распределения мощности в сечении лазерных пучков, функции полного распределения интенсивности в измерительном объеме, а также анализ оптических потерь в элементах ЛДА. Установлено, что оптический канал системы контроля пространственной частоты интерференционной картины измерительного объема целесообразно строить на основе сканирующего преобразователя свет-сигнал (ПСС) /8/. Сущность метода анализа состоит в дискретизации изображения интерференционной картины ЛДА посредством разложения ее на  $512 \times 512$  элементов с последующим аналогоцифровым преобразованием всех элементов разложения и формированием двумерного массива данных.

Рассмотрена разработанная система автоматизированного многоканального анализа визуализированных изображений на основе сканирующего ПСС с автоматической коррекцией нелинейности и перекоса изображения по отношению к направлению сканирования на мишени ПСС /7/. Параметры системы: диапазон входных интенсивностей  $0,05 - 10^2$  лк, оптический диапазон  $0,3 - 1,5$  мкм, время обработки кадра - 30 мкс, при максимальной погрешности 0,2% при определении линейных размеров изображения.

Анализ пространственно-энергетических характеристик источников лазерного излучения проводился при помощи созданного оптического анализатора /19/ на основе фотодиодной  $1024$  канальной матрицы с возможностью произвольной выборки информации. Введение цикла автоматической коррекции чувствительности элементов матрицы позволило создать оптический анализатор с хорошей однородностью ячеек приемника. Порог чувствительности системы  $10^{-13}$  Дж, время считывания кадра - 230 мкс, частота поступления входных сигналов - 300 Гц, динамический диапазон интенсивностей 40 дБ. Разработанный оптический анализатор позволил впервые экспериментально исследовать функцию плотности распределения интенсивности в сечении луча рубинового лазера в режиме модуляции добротности и свободной генерации, аргонового лазера в непрерывном режиме и полупроводниковых лазеров на  $GaAs$  /14/.

Комплексная диагностика параметров созданных анализаторов осуществлена на основе предложенного метода калибровки оптических анализаторов /3/ на основе многозначных реперов и разработанного синтезатора образцовых интервалов времени и амплитуд /17/.

Разработано математическое обеспечение /15/ систем диагностики и контроля параметров визуализированных объектов и анализа пространственно энергетических параметров оптических полей в ЛДА.

Предложен ряд методов определения малых оптических потерь в элементах ЛДА и на этой основе создан спектрометр с высоким амплитудным разрешением /18/, с пассивным интегрированием разности фототоков двух фотоприемников (А.с.№1254846) и с исключением нелинейной зависимости величины поглощения от энергии зондирования (А.с.№1012654) с минимальным разбросом значений оптической плотности, не превышающей  $D = 5,2 \cdot 10^{-4}$ .

Созданный набор экспериментальных систем диагностики параметров ЛДА имеет более широкое приложение и в настоящее время используется для анализа изображений с электронно-лучевых трубок, в спектрометре для нелинейной спектрофотометрии.

Третья глава посвящена разработке принципов построения оптоэлектронных устройств и созданию элементной базы измерительных трактов ЛДА с временным принципом измерения доплеровского сигнала.

Рассмотрен предложенный принцип построения многоканального анализатора временной и амплитудной структуры доплеровских сигналов. В основу созданного анализатора положен метод анализа реализаций доплеровского сигнала, основанный на последовательном измерении формы выходного сигнала фотоприемника ЛДА методом стробирования с одновременным формированием временного аналога данного процесса в моменты, соответствующие пересечению доплеровским сигналом заданного порогового уровня  $U_n$ , и многоканальным анализом функции распределения зарегистрированных периодов входного сигнала /16/.

Установлено (гл. I), что  $F(U_n)$  должно полностью определяться видом сгибающей исследуемого доплеровского процесса.

Показано, что метод анализа временной структуры флуктуирующей сигнала ЛДА позволяет за счет использования следящего порога, в соответствии с рекомендациями численного моделирования (гл. I), минимизировать погрешности, присущие методу временного анализа в случае значительных флуктуаций амплитуды и формы изучаемого процесса. Для реализации метода необходимо осуществить преобразование доплеровского сигнала, в соответствии с оператором

$$W(U_n) = \begin{cases} 1, & \text{при } x > U_n \text{ и } t_n < t < t_n' \\ 0, & \text{при } x < U_n \end{cases} \quad (2)$$

В результате чего в блоке определения временного положения (ОВП) формируется временной аналог исследуемого процесса в виде импульсного случайного процесса  $y(t) = \sum_{n=1}^N a_n \delta(t - t_n)$  со стандартным набором информационных импульсов, временное положение которых строго соответствует пороговому уровню  $U_n$ . Анализ последовательности интервалов  $t_n, t_{n+1}$  импульсного процесса  $y(t)$  проводится в режиме временного запаздывания на величину  $T_0$ , необходимую для компенсации затрат времени анализатора на измерение одного (предыдущего) периода  $t_n$ . Формирование временного сдвига  $T_0$  процесса  $y(t)$  предложено осуществить при помощи измерительного преобразователя времякод /I7/. Минимизация аппаратных искажений в анализаторе доплеровского сигнала осуществляется введением стабилизации временной шкалы внешним образцовым СВЧ сигналом /II/ и параметрической линеаризацией каналов аналого-цифрового преобразователя при малых значениях амплитуд.

Рассмотрен разработанный анализатор доплеровского сигнала, который позволяет производить измерения периода входного сигнала в соответствии с алгоритмом  $t_m = T_0 + \Delta t_0 + \Delta t_m$ , где  $m$  - число опорных интервалов,  $T_0$  - период опорной временной шкалы,  $\Delta t_m$  - выходная величина время-амплитудного преобразователя, с разрешающей способностью  $5 \cdot 10^{-11}$  с в диапазоне рабочих частот 20 МГц - 100 кГц и  $2 \cdot 10^{-9}$  с в диапазоне 100 кГц - 500 Гц, погрешность амплитудного кодирования реализаций 0,3% при ширине стробирующего окна 10 нс - 1000 нс. Анализатор позволяет вести анализ доплеровского сигнала с осреднением по ансамблю реализаций соответствующих  $1 + 512$  пересечениям порогового уровня в диапазоне периодов исследуемого сигнала 0,3 мкс - 1 с, а также процессов в диапазоне периодов 50 нс - 300 нс при условии формирования временного аналога доплеровского процесса методом осреднения периодов.

Предложены принципы построения измерительно-вычислительных устройств ЛДА - источников опорных колебаний и временных шкал ЛДА, быстродействующего двухшкального аналого-цифрового преобразователя. В качестве источников реперных внутренних шкал времени ЛДА использовались разработанные синхронизируемые внешним СВЧ колебанием с фазированием по случайному сигналу генераторы с задержанной обратной связью (ГЗОС) с перестраиваемым и фиксированным периодом. Диапазон перестройки создан-

ных синтезаторов шкал ( $20 + 120$  нс), относительная нестабильность частоты в режиме СВЧ синхронизации  $\Delta f/f = 2 \cdot 3 \cdot 10^{-10}$ .

Созданный набор базовых элементов измерительного тракта ЛДА имеет более широкое применение и в настоящее время используется в системах многоканального временного анализа быстропротекающих оптических процессов /16/.

В четвертой главе рассмотрены разработанные ЛДА временно-го типа и проанализированы результаты проведенных экспериментальных исследований многофазных потоков.

Для изучения турбулентности и профилей скорости жидкостных струевых потоков создан лазерный доплеровский анализатор турбулентности временного типа /5/. В основу лазерного анализатора турбулентности положен принцип анализа функции плотности распределения флуктуаций периодов доплеровского сигнала. При использовании синтезируемых реперных шкал времени с нестабильностью периода  $10^{-9}$  в режиме фазовой СВЧ синхронизации, совместно с интерполяционным преобразователем время-код в измерительном контуре анализатора, получена точность формирования и измерения временного аналога доплеровского процесса  $\sim 5,0 \cdot 10^{-10}$  с. Вычислительное ядро анализатора построено на основе микро-ЭВМ ДМК-2М, что позволяет минимизировать время осреднения доплеровского процесса до 100 мкс при исследовании параметров скорости и турбулентности жидкостных струевых потоков /2/. Диапазон измеряемых скоростей анализатора от 0,1 м/с до 50 м/с, погрешность измерения потоков с высокой концентрацией рассеивающих центров 0,2%.

На данном анализаторе проведены эксперименты по исследованию динамики движения свободной струи жидкости, вытекающей из сопла различного диаметра. Проведенные измерения профилей скоростей, а также продольных и поперечных турбулентностей в различных сечениях струи позволили определить диаметр сопла и начальную скорость истечения для определенного диаметра сопла, при которой наблюдается максимальный распыл исследуемой струи.

Для исследования потоков с низкой концентрацией рассеивающих центров разработан лазерный доплеровский измеритель скорости воздушного потока на основе 128-канального коррелятора фотонов с минимальным временным окном и шагом перестройки 40 нс /6/. Измеритель выполнен на основе аргонового лазе-

ра  $\lambda = 488$  нм мощностью 2 Вт. с использованием дифференциальной оптической схемы с большой зеркальной приемно-передающей оптической системой. Диаметр приемника  $\phi = 50$  см. Для обработки результатов используется ЭВМ "Электроника-60М". Погрешность измерения скорости не превышала 1%. Экспериментальные результаты проведенных измерений скорости ветра на высоте 20 м и максимальном удалении 25 м представлены на рис.2. Там же даны коэффициенты турбулентности для различных точек потока.

В заключении главы рассмотрен созданный многофункциональный лазерный анемометр /1,2/, в котором обобщены методы создания ЛДА временного типа. Многофункциональный ЛДА построен на основе аргонового лазера ЛГ-106М по модифицированной оптической схеме (гл. I) с измерительным ядром на основе анализатора временной и амплитудной структуры доплеровского сигнала (гл. III)

В структуру многофункционального ЛДА введена система контроля рабочих параметров ЛДА (гл. II), что позволило вести оперативную диагностику параметров анемометра в том числе и в процессе рабочего цикла. Показано, что распределение энергии в сечении аргонового лазера в широком спектре мощностей и различном удалении от выходного зеркала хорошо описывается гауссовой кривой. Установлено, что пространственная деформация распределения энергии на выходе жидкостного АОМ, наблюдаемая при больших мощностях излучения, объясняется локальным разогревом наполнителя АОМ. Для твердотельных АОМ такой зависимости не наблюдалось. Отклонение функции распределения энергии от Гаусса рассчитывалось по критерию  $\chi^2$ . Исследованы предельные характеристики многофункционального ЛДА. При анализе интерференционной картины измерительного объема ЛДА экспериментально изучена зависимость периода интерференционной картины от угла пересечения пучков  $\alpha$  и координат измерительного объема. Величина изменения периода достигает значения  $\sim 10\%$  на границе

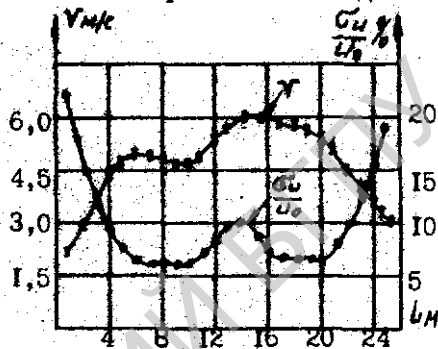


Рис.2. Профиль распределения скорости и коэффициентов турбулентности воздушного потока.

объема, координаты которого определялись экспериментально и рассчитывались теоретически. Расхождение не превышало 5%. Определен угол пересечения  $\alpha$ , при котором величина погрешности минимальна  $\alpha_{opt} = 109,5^\circ$ . Показана возможность компенсации погрешности, обусловленной нелинейностью периода интерференционной картины и селекцией границ измерительного объема ЛДА.

Проанализированы разработанные алгоритмы работы ЛДА. Оценивание параметров доплеровского сигнала производится по гистограммам распределения мгновенных значений периодов. Программное обеспечение позволяет производить построение пространственных распределений скоростей, вычисление степени турбулентности потока. Диапазон измеряемых скоростей многофункционального ЛДА 0,1 м/с - 150 м/с, погрешность 0,1%. Проведено экспериментальное сравнение разработанного многофункционального ЛДА с термоанемометром (рис.3). Результаты измерений подтвердили высокие потенциальные возможности разработанного ЛДА на основе многоканального временного анализа периодов доплеровского сигнала. Получено увеличение пространственного разрешения до значений, равных периоду интерференционной картины при осреднении зарегистрированных периодов по ансамблю реализаций.

В приложении даны описания разработанных спектрометра для нелинейной спектрофотометрии и лазерного ретинметра, в основу которого положена предложенная модифицированная оптическая схема /А.с. № 1334411/, приведены программы обработки доплеровских сигналов.

#### Основные выводы и результаты работы

1. Предложен метод анализа доплеровского сигнала, основанный на формировании и анализе временного аналога исследуемого сигнала, позволяющий осуществлять анализ доплеровских сигналов в широком частотном диапазоне при значительных

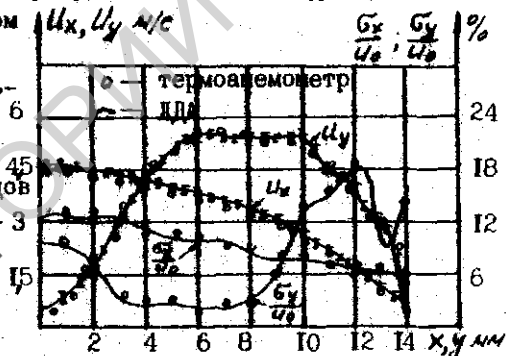


Рис.3. Сравнительные результаты исследования характеристик многофазного потока термоанемометром и многофункциональным ЛДА.



флуктуациях его интенсивности; методом численного моделирования оценен вид функции распределения периодов сформированного временного аналога доплеровского сигнала; определено оптимальное значение величины порога временной дискретизации и вида функции отслеживания порога, минимизирующее погрешности преобразования доплеровского процесса в его временной аналог; показана эффективность построения ЛДА на основе многоканального временного анализа.

2. Предложена и обоснована структурная модель ЛДА на основе многоканального временного анализа доплеровского процесса, удовлетворяющая требованиям получения высокой точности измерения доплеровских процессов различной интенсивности в широком частотном динамическом диапазоне; предложен метод построения ЛДА с временной обработкой доплеровского сигнала, основанный на многоканальном анализе вероятностной структуры временных флуктуаций частоты доплеровского сигнала, позволяющий исследовать флуктуации периодов сигнала ЛДА при длине реализации  $I + 5I^2$  пересечений порогового уровня от потоков с различной степенью турбулентности и концентрацией рассеивающих центров; предложены принципы построения измерительно-вычислительных устройств ЛДА – источников опорных колебаний и временных шкал ЛДА, быстродействующего двухшкального аналого-цифрового преобразователя, многоканальных анализаторов статистических распределений интервалов времени.

3. Предложены методы метрологической аттестации основных параметров ЛДА и созданы экспериментальные образцы устройств контроля рабочих параметров ЛДА: анализатор пространственной частоты интерференционной картины измерительного объема, многоканальный оптический анализатор для определения параметров пространственно-энергетических распределений в интерферирующих пучках и полного профиля интенсивности в измерительном объеме, автоматические устройства определения коэффициентов оптических потерь в элементах анемометра, что позволило наряду с диагностикой основных параметров ЛДА осуществлять управление ими в рабочем цикле анемометра.

4. Создан базовый экспериментальный образец измерительного анализатора ЛДА с автоматическим анализом временной и амплитудной структуры доплеровского сигнала с разрешающей способностью  $5 \cdot 10^{-11}$  с в диапазоне рабочих частот 20 МГц – 100 кГц

и  $2 \cdot 10^{-9}$  с в диапазоне 100 кГц - 500 Гц, погрешностью амплитудного кодирования реализаций 0,3% при ширине стробирующего окна 10 нс - 1000 нс, позволяющий вести анализ доплеровского сигнала с осреднением по ансамблю реализаций соответствующих 512 пересечениям порогового уровня в диапазоне периодов исследуемого сигнала 0,3 мкс - 1 с, а также быстропротекающих процессов в диапазоне периодов 50 нс - 300 нс при условии формирования временного аналога доплеровского процесса методом осреднения периодов.

5. Создан ряд экспериментальных образцов ЛДА временного типа - анализатор турбулентности жидкостных потоков с диапазоном регистрируемых скоростей 0,5 м/с - 50 м/с, погрешностью 0,2% и минимальным временем усреднения  $10^{-4}$  с, измеритель скорости воздушного потока, на основе коррелятора с клипированием и погрешностью 1,0%; многофункциональный доплеровский анемометр с анализом функций распределения периодов временного аналога доплеровского сигнала и возможностью регистрации доплеровских сигналов от потоков с различной степенью турбулентности и концентрацией рассеивающих центров с минимальной погрешностью измерения - 0,1% и диапазоном скоростей 0,1 м/с - 150 м/с.

6. Экспериментальные исследования динамики движения свободной струи жидкости, вытекающей из сопла, позволили определить параметры сопла и начальную скорость струи, для достижения максимального распыла исследуемой среды; проведено дистанционное профилирование воздушного потока и вычислены коэффициенты турбулентности для различных точек потока; сравнительный анализ термоанемометра и разработанных ЛДА временного типа в задачах профилирования скоростей и определения коэффициентов турбулентности многофазных газовых и жидкостных потоков подтвердил высокие метрологические характеристики разработанных анемометров временного типа; использование временного анализа исследуемого процесса позволило получать значение мгновенной скорости потока на каждом периоде исследуемого сигнала; при осреднении зарегистрированных периодов по ансамблю реализаций получено увеличение пространственного разрешения до значений, равных периоду интерференционной картины измерительного объема.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Мазевин И.А., Устинов В.П., Чубаров С.И. Исследование динами-

- ки струйных течений методами лазерной доплеровской анемометрии. В кн: Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстропотекающих процессов. Тез. докл. I2 ВНТК, Москва, 1985, с. 76.
2. Чубаров С.И. Многофункциональный лазерный доплеровский анемометр для исследования газовых и жидкостных потоков. В кн: Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстропотекающих процессов. Тез. докл. I2 ВНТК, Москва, 1985, с. 91.
3. Зенченко С.А., Чубаров С.И. Использование непрерывных лазеров с синхронизацией мод для калибровки электронно-оптических преобразователей и оптических анализаторов. В кн: Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстропотекающих процессов. Тез. докл. I2 ВНТК, Москва, 1985, с. 61.
4. Баранчиков В.М., Чубаров С.И., Устинов Б.П. Многофункциональный оптический многоканальный анализатор быстропотекающих процессов. В кн: Высокоскоростная фотография, фотоника и метрология быстропотекающих процессов. Тез. докл. I2 ВНТК, Москва, 1985, с. 115.
5. Малевич И.А., Гиль В.В., Чубаров С.И. Лазерный анализатор турбулентности. Тез. докл. 2-ой ВНТК "Применение лазеров в технике и системах передачи и обработки информации". Ленинград, 1984, с. 97.
6. Малевич И.А., Зенченко С.А., Гиль В.В., Чубаров С.И. Лазерный доплеровский измеритель скорости воздушного потока. В кн: Лазерное оптическое и спектральное приборостроение. Минск, 1986, с. 384-386.
7. Баранчиков В.М., Устинов Б.П., Чубаров С.И. Метод устранения погрешности, связанной с нелинейностью развертки в системах формирования изображения. Тез. докл. ВНТК "Формирование оптического изображения и методы его коррекций". Могилев, 1979, с. 128.
8. Баранчиков В.М., Малевич И.А., Чубаров С.И. и др. Система автоматизированного контроля параметров изображений с экрана электронно-лучевых трубок. ПТЭ, 1983, №2, с. 252-253.
9. А.с. №1234846 (СССР). Устройство измерений коэффициентов ослабления световых импульсов / Воропай Е.С., Малевич И.А., Торпачев П.А., Чубаров С.И. ДСП.
10. А.с. №1334411 (СССР). Лазерный ретинометр / Зенченко С.А., Левин В.И., Малевич И.А., Устинов Б.П., Чубаров С.И. ДСП.
11. Временко Д.А., Малевич И.А., Чубаров С.И. Высокостабильные управляемые источники импульсных колебаний с диодом с накопле-

нием заряда в петле обратной связи. ИТЭ, 1979, №1, с.97-100.  
12. А.с. №1012654 (СССР). Способ измерения спектров двухфотонного поглощения / Воропай Е.С., Малевич И.А., Торпачев П.А., Чубаров С.И. ДСП.

13. Баранчиков В.М., Устинов Б.П., Чубаров С.И. Система оптического многоканального анализа с твердотельным матричным фотоприемником. В кн: Лазерное оптическое и спектральное приборостроение. Минск, 1986, с.384-386.

14. Малевич И.А., Чубаров С.И. Исследование пространственного распределения мощности в сечении оптического луча. Тез. докл. РНТК "Проблемы создания и применения в народном хозяйстве лазерной и оптоэлектронной техники", Минск, 1982, с.121-122.

15. Баранчиков В.М., Малевич И.А., Чубаров С.И. и др. Математическое обеспечение автоматизированной системы многоканального анализа. Тез. докл. РНТК "Проблемы создания и применения в народном хозяйстве лазерной и оптоэлектронной техники", Минск, 1982, с.114-115.

16. Андренко А.А., Баранчиков В.М., Чубаров С.И. и др. Многоканальный стробоскопический анализатор сигналов. ИТЭ, 1980, №1, с.280.

17. Баранчиков В.М., Моськин В.А., Запольская Л.И., Чубаров С.И. Синтезатор сетки эталонных амплитуд и интервалов времени информационно-измерительных систем. Тез. докл. РНТК "Проблемы применения современных радиофизических методов для повышения эффективности производства и автоматизации исследований", Минск, 1981, с.46-47.

18. Воропай Е.С., Малевич И.А., Торпачев П.А., Чубаров С.И. Спектрометр для нелинейной спектрофотометрии. Сб. ст. "Импульсная фотометрия", Ленинград "Машиностроение", 1986, с.45-57.

19. Баранчиков В.М., Устинов Б.П., Чубаров С.И. Система оптического многоканального анализа с твердотельным матричным фотоприемником. В кн: Лазерное оптическое и спектральное приборостроение, Минск, 1986, с.381-383.

20. Чубаров С.И., Баранчиков В.М. Блок оперативного запоминающего устройства для сопряжения быстродействующих преобразователей аналог-код с мини-ЭВМ. ИТЭ, 1983, №2, с.237-239.

Подп. к печ. 1988 г. Зак. №27. Тир. 100 экз. Бесплатно. Формат 60 x 84/16. Объем 1,3 л.д. Отпечатано на ротационте ВВУ им. В.И. Ленина, 220030, Минск, Вобруйская, 7.