

УДК 528.87

**Ю. Н. Дубнищев**  
(Новосибирск)

### ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПОТОКОВ

Обсуждаются оптические методы диагностики потоков в рамках ретро-спективного обзора работ, выполненных в Институте автоматки и электрометрии и в Институте теплофизики СО РАН.

Проблемы невозмущающего контроля потоков газовых и конденсированных сред в задачах экспериментальной гидродинамики, теплофизики и в промышленности предопределили развитие измерительных технологий, основанных на достижениях оптики. Еще Анри Пуанкаре отмечал особую роль оптики в постижении законов природы, ибо «... все наши инструменты, как те, которыми ребенок обязан Природе, так и те, которыми ученый обязан своему гению, имеют в качестве основных частей твердое тело и световой луч» [1].

Широкий спектр диагностических задач порождает многообразие оптических методов, отличающихся функциональными возможностями и техническими решениями. На рис. 1 приведены основные способы оптической диагностики потоков. Схема не претендует на исчерпывающую универсальность и полноту. Она является скорее попыткой обозначить систему понятий и взаимных связей, в рамках которых рассматривается состояние проблемы, и отражает пристрастие автора к профессионально близким областям. Как следует из рисунка, оптические методы диагностики потоков можно условно разделить на три основных направления, включающих в себя измерение кинематических, структурных и термодинамических параметров. Различные физические модели исследуемых процессов приводят к размыванию границ между этими направлениями.

Среди оптических методов измерения скорости получили широкое распространение времяпролетные и трековые [2, 3]. Они основаны на дискретизации исследуемого процесса за счет пространственно-временного стробирования изображения рассеивающих частиц в исследуемом сечении. Достижения вычислительной техники в обработке изображений обеспечили этим методам мощное развитие и признание, несмотря на существенные ограничения функциональных возможностей, связанных с жесткой зависимостью пространственно-временного разрешения и чувствительности от концентрации и размеров визуализирующих частиц.

Другое плодотворное направление когерентно-оптических методов измерения скорости – лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) – основано



ции: схема с опорным пучком [12–15], дифференциальная [16, 17] и инверсно-дифференциальная с фотосмещением боковых полос фурье-спектра оптического сигнала [18, 19]. Тогда же были развиты компенсационные ЛДА с дифференциальным подавлением низкочастотного пьедестала доплеровского сигнала [9, 20–22]. В [8] указывалось на возможность описания основных схем ЛДА в рамках некогерентной фурье-оптики. Такой подход оказался плодотворным и получил развитие с учетом когерентных эффектов для анализа оптических измерительных схем как в координатном, так и в дуальном к нему  $k$ -пространстве [23, 4–7]. В 1975 году появилась первая в мире монография, посвященная лазерным доплеровским измерителям скорости [4]. В 1973–1974 гг. на Новосибирском приборостроительном заводе были выпущены первые в СССР опытные партии одноканальных лазерных анемометров, разработанных в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР.

При измерении вектора скорости одним из ключевых является выбор способа селекции компонент. Селекция компонент вектора скорости может быть поляризационной, пространственной, хроматической, частотной и временной [4, 7]. Эти методы, за исключением последнего, связаны с делением мощности лазерного излучения по измерительным каналам, определяющим компоненты вектора скорости. В многоканальных системах параллельного действия проявляется снижение энергетической эффективности, особенно при измерениях скорости в режиме обратного рассеяния, когда интенсивность светового сигнала падает на три–четыре порядка в сравнении с интенсивностью света, рассеянного вперед. Кроме того, применение хроматического и поляризационного признаков селекции зависит от оптических свойств исследуемой среды (таких как, например, дисперсия, оптическая активность, деполяризация). Хроматические, пространственные и поляризационные методы широко распространены. Частотная селекция применяется в ЛДА значительно реже. При частотной селекции в многоканальных системах используется одноканальный приемник, что упрощает схемные решения измерителя. Примером такой разработки является созданный в ИАиЭ СО АН СССР совместно с фирмой «Карл Цейс Йена» (ГДР) лазерный анемометр ЛАДО-2 [7]. В ранее разработанном приборе ЛАДО-1 [24] применялась пространственная селекция.

Временная селекция может быть принудительной и адаптивной. В литературе имеются описания экспериментальных макетов ЛДА, действие которых основано на временном разделении сигналов, соответствующих ортогональным компонентам вектора скорости [25]. Коммутация каналов осуществляется внутри интервала, равного времени пересечения зондирующего лазерного пучка рассеивающей частицей. При этом энергия лазерного излучения остается поделенной между оптическими каналами.

Свободным от этих недостатков является метод лазерной доплеровской анемометрии с адаптивной временной селекцией и визуализацией вектора скорости [26]. Отличительные особенности метода – повышение точности за счет автоматического согласования временной селекции компонент вектора скорости с пространственным распределением рассеивающих частиц в потоке, улучшение помехоустойчивости электронной системы обработки сигнала и высокая энергетическая эффективность, связанная с тем, что для измерения одной компоненты скорости используется полная мощность лазерного излучения. Лазерный анемометр с адаптивной временной селекцией и визуализацией вектора скорости (ЛДА АВС) создан в Институте теплофизики СО РАН совместно с Конструкторско-технологическим инсти-

тутом научного приборостроения, на производственной базе которого была выпущена опытная партия приборов. Разработан оптико-волоконный функциональный аналог этого измерителя (ВЛДА АВС).

Оптическая анемометрия с адаптивной пространственно-временной селекцией вектора скорости [27, 28] позволяет многократно повысить плотность потока энергии в зондирующем поле при неизменной мощности оптического (лазерного) излучения. Зондирующее поле формируется посредством адаптивной пространственной развертки сфокусированного луча в последовательный ряд позиций с заданным расстоянием между ними. Устройства, реализующие адаптивную пространственно-временную селекцию компонент вектора скорости, отличаются размерностью оптического дефлектора и использованием логического коммутатора измерительных каналов, управляющего дефлектором.

Обратимся к ЛДА, работающим в когерентном режиме. Принцип измерения заключается в оптической селекции когерентных компонент доплеровского сигнала, которые образуются за счет перекрестной интерференции световых волн, рассеянных пространственно разнесенными оптическими неоднородностями [29]. Такими неоднородностями, в частности, могут считаться границы, оконтуривающие размеры частиц. Применение фурье-фильтра, селективирующего когерентный сигнал от частицы заданного размера в ЛДА, позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум даже в случаях, когда доплеровский сигнал ЛДА, работающего в некогерентном режиме, при определенных размерах частиц не превышает уровня шума.

В схемах с фотосмещением боковых полос фурье-спектра оптического сигнала повышение отношения сигнал/шум достигается за счет адаптивного согласования пространственно-частотной структуры зондирующего оптического поля со средним размером частиц. В [30] на примере схемы ЛДА с фотосмещением боковых полос фурье-спектра показана возможность повышения чувствительности измерений за счет перераспределения степеней свободы оптического сигнала.

Все известные способы селекции  $2D$  и  $3D$  вектора скорости традиционно сводятся к образованию многоканальной оптической системы, в каждом измерительном канале которой формируется вектор чувствительности, задающий направление одной из осей ортогонального координатного базиса. Например, лазерные анемометры, выпускаемые фирмами "Dantec" (США, Дания) и "Thermosystems" (США), основаны на пятилучевой конфигурации зондирующих лучей, ограниченной телесным углом  $\sim \pi/2$ , и содержат три измерительных канала [31]. Мультиплицирование оптических измерительных каналов усложняет систему, снижает надежность и ограничивает функциональные возможности, затрудняя, в частности, измерения в пространственно ограниченных потоках, пристенных областях и т. п. [32]. Исключение составляет лазерная доплеровская анемометрия с адаптивной временной и пространственно-временной селекцией вектора скорости. Однако ее возможности ограничиваются частотой коммутации измерительных каналов. Другая проблема заключается в повышении чувствительности измерений, которая пропорциональна модулю вектора чувствительности  $K$ , определяемого вектором решетки (амплитудной или фазовой) зондирующего светового поля. Очевидный путь повышения чувствительности состоит в поиске конфигураций оптической измерительной схемы с максимальным модулем  $|K|$  [33]. Измерение ортогональных пар компонент вектора скорости производится путем вычитания и суммирования частот электри-

ческих сигналов, соответствующих проекциям вектора скорости на векторы чувствительности выбранной пары, а модули этих векторов чувствительности задаются равными между собой. Способ реализуется в конфигурациях с меньшим числом зондирующих и рассеянных световых пучков, чем в известных оптических системах, что особенно важно при оптико-волоконном исполнении [34]. Другое достоинство – выигрыш в чувствительности измерений.

В лазерной доплеровской анемометрии пространственно-временные характеристики оптического сигнала, сформированного из дифрагированного на частицах света, несут информацию не только о скорости, но и о структурных и фазовых свойствах рассеивателей. Извлечение и однозначная интерпретация этой информации представляют известные трудности. Примером могут служить фазовый метод [35], а также измерения, основанные на анализе амплитудного спектра сигнала [36].

Существенным недостатком, ограничивающим применение этих способов, является узкий динамический диапазон. Реализация фазового метода требует двухканальной измерительной системы. Для контроля размеров, основанного на применении оптической фильтрации, в том числе адаптивной, необходима априорная информация об исследуемой среде, что вызывает затруднения при измерениях в реальном масштабе времени. Такие системы удобны для допускового контроля.

В [37] предложен метод измерения размеров частиц, функционально совместимый с лазерной доплеровской анемометрией. Измерение основано на получении в реальном времени автосвертки изображения частицы в рассеянном свете.

Ориентация на использование в системах оптической диагностики перспективной элементной базы определяет не только технические решения, но и функциональные возможности измерительных устройств. В частности, это относится к полупроводниковым лазерам (ПЛ). При очевидных достоинствах ПЛ имеют особенности, затрудняющие непосредственное применение в оптических измерительных системах (например, в лазерной доплеровской анемометрии) и требующие осторожного обращения. К ним относятся: широкая диаграмма направленности лазерного пучка, узкий рабочий диапазон токов накачки, сильная зависимость модового состава и спектральной полосы излучения от тока накачки и температуры. В описанном в [38] полупроводниковом ЛДА с парафазным принудительным стробированием измерительных каналов эта зависимость не исключена, что существенно ограничивает точностные характеристики. Еще в большей мере эти ограничения присущи другим оптическим схемам полупроводникового ЛДА [39].

Полупроводниковая лазерная анемометрия развивается в направлении поиска схемных решений, компенсирующих указанные ограничения. Снижение зависимости результатов измерений от флуктуации длины волны излучения ПЛ достигается при стабилизации температуры и тока накачки лазерного диода либо за счет введения в измерительную систему компенсирующих дисперсионных оптических элементов, функции которых в оптических схемах может выполнять дифракционный лучевой расщепитель [40, 41].

В физической модели, на которой базируются различные системы обработки доплеровского сигнала счетно-импульсного типа [4, 7, 42, 43], исходят из того, что огибающая сигнала соответствует пространственному распределению интенсивности в зондирующем поле, дискретизированному движу-

---

щимися рассеивающимися частицами. На сигнал наложен аддитивный шум, складывающийся из дробового шума, обусловленного квантовым характером оптических полей, шума фотоприемника, усилителя и т. д. [44]. Доплеровский сдвиг частоты оценивается по пересечениям контрольного нулевого уровня в моменты, когда огибающая сигнала превышает установленный в соответствии с уровнем шума порог. Операция оценки качества сигнала выполняется формирователем последовательностей счетных и строб-импульсов. Эти последовательности подвергаются цифровому интегрированию для получения значения средней скорости и аналоговой демодуляции с целью выделения информации о пульсациях скорости.

Точность работы определяется главным образом точностью работы формирователя последовательностей счетных и строб-импульсов. Описанным в литературе формирователям присуща сильная зависимость погрешности измерений от качества фильтрации входного сигнала и разности порогового и контрольного уровней.

С целью повышения помехозащищенности процессоров, предназначенных для обработки доплеровского сигнала, разработан способ дифференциального адаптивного формирования счетных и строб-импульсов [45]. Способ реализован в счетно-импульсном процессоре, ориентированном на работу в ЛДА с адаптивной коммутацией измерительных каналов. Вместе с тем разработка имеет самостоятельное значение и может применяться в других типах ЛДИС.

Критичность счетно-импульсных систем ЛДА к шумам приводит к необходимости высококачественной предварительной фильтрации доплеровского сигнала. Введение узкополосных фильтров сужает динамический диапазон измеряемых скоростей. Счетно-импульсная обработка с автоматической параллельной фильтрацией сигналов [42] не нашла заметного применения из-за коммутационных помех, возникающих при переключении фильтров. Поэтому в технике ЛДА интенсивное развитие получили следящие системы обработки сигнала [42, 44], в том числе оптико-электронные [46], с фазовой и частотной автоподстройками частоты, автоматически выполняющие узкополосную фильтрацию сигнала в заданном диапазоне доплеровских частот. Однако сужение частотной полосы размнивается на быстродействие следящей системы, и, хотя статическая точность измерений остается высокой, динамическая погрешность растет.

Обеспечение необходимой точности измерений и хороших динамических характеристик предъявляет определенные требования к относительному уровню шумов в сигнале. Компромисс легче всего достигается, если следящий процессор сопряжен с оптической системой, обеспечивающей высокую эффективность использования мощности лазерного излучения (например, в режиме временной селекции компонент вектора скорости). Существенное улучшение качества работы и расширение функциональных возможностей ЛДА со следящим процессором требуют поиска решений ряда проблем. К ним относится обеспечение полностью автоматического (без участия оператора) режима работы в широком диапазоне измеряемых скоростей, что связано с выбором алгоритма поиска доплеровского спектрального пика, а также с автоматической адаптацией петли слежения к характеристикам входного сигнала [44, 27]. Сюда же следует отнести представление выходной информации ЛДА в виде синтезированного в реальном времени вектора скорости.

Наряду с адаптивной и пространственно-временной селекцией вектора скорости, развиваются и другие нетрадиционные направления ЛДА. Одно из них – лазерная анемометрия потоков с фазовыми неоднородностями (среды с температурными градиентами, флуктуациями оптической плотности, с оптически активной структурой и т. п.). Специфические проблемы сводятся к появлению паразитной частотной модуляции доплеровского сигнала, вызванной движением оптических неоднородностей в потоке, а также вариациями положения световых пучков, ведущих к деформации структуры зондирующего оптического поля. Обычно в этих случаях в результаты измерения вводятся расчетные корректирующие поправки [47, 48], что не всегда возможно. Плодотворные решения этой проблемы достигаются в корреляционных и полихроматических системах [7, 49, 50].

Исследования динамических параметров потоков с фазовой оптической структурой осуществляются методами ЛДА, ОЧД и теневыми. На практике обычно применяются тепловские приборы, получающие черно-белые тенеграммы оптического поля плотности или цветные с псевдоокрашиванием, выполняемым средствами вычислительной техники. Разработан метод цветной визуализации фазовой структуры потоков в реальном масштабе времени, основанный на полихроматической фильтрации Фуко – Гильберта [50, 51]. Отличительные особенности этого метода – повышение чувствительности за счет цветового контраста и хроматическое кодирование знака пространственно-временных флуктуаций коэффициента преломления в оптически неоднородной среде. Методом бихроматической фильтрации Гильберта впервые были обнаружены крупномасштабные вихревые структуры в виде двойной спирали в закрученном потоке Ранка [52]. Пример визуализированных биспиральных вихревых структур приведен на рис. 2. Закрученный поток создавался в трубке Ранка квадратного сечения  $34 \times 34$  мм. Методом гильберт-визуализации выявлены пространственные градиенты фазового поля оптической плотности в радиальном и осевом направлениях вихревого канала в реальном времени с минимальным временем экспозиции (250 мкс) при различных динамических режимах. Двойная вихревая спираль зарождается на плоской торцевой поверхности «горячего» (на рисунке нижнего) конца трубки Ранка. По мере удаления от этой поверхности в направлении оси канала наблюдаются участки перезамыкания, фрагментации и разрушения двойной вихревой спирали. Зафиксировано ее вращательное движение.

Одно из перспективных направлений в развитии систем оптической диагностики потоков связано с использованием оптической частотной дискриминации доплеровского сдвига частоты [7, 53–55]. Функции оптических частотных дискриминаторов могут выполняться элементами с дисперсионной усиливающей или поглощающей средой, а также, например, оптическими процессорами с когерентной обратной связью [7]. На основе оптического частотного дискриминатора, согласованного с лазерным источником по модовой структуре излучения, реализована возможность визуализации и

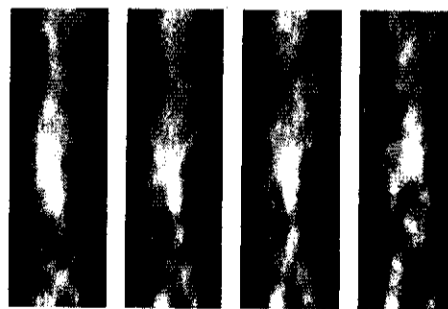


Рис. 2

измерения в реальном масштабе времени поля скорости [7, 56]. Отличительная особенность этих систем состоит в преобразовании временных параметров оптического излучения (частота) в пространственные (угол, пространственная частота), что позволяет применять для изучения динамических характеристик исследуемого процесса методы оптической обработки информации.

Специфические проблемы возникают при разработке измерителей скорости и длины движущихся светорассеивающих поверхностей. В выпускаемых за рубежом измерителях скорости и длины (например, приборы фирм "Messmetallurgy" (Германия), "Thermosystems" (США) [27]) используются технические решения, основанные на базовых схемах ЛДА без учета специфики задачи в построении оптических (учет спекл-структуры оптического сигнала при рассеянии движущейся поверхности) и электронных измерительных каналов (обработка многочастичного сигнала с высоким уровнем фазовых шумов и низким контрастом).

Разработаны технические решения измерительных схем, позволяющие повысить отношение сигнал/шум оптического сигнала [30, 57]. Способ редукации относительной времяпролетной ширины спектра доплеровского сигнала [58], основанный на перераспределении пространственных и временных степеней свободы сигнала, позволяет выбирать динамический диапазон длин и скоростей, измеряемых с заданной погрешностью и быстродействием. Он реализован в практических лазерных измерительных системах, предназначенных для метрологического обеспечения производства металлургического проката и в других отраслях промышленности, связанных с необходимостью невозмущающего контроля параметров механического движения. Первый экспериментальный макет измерителя скорости горячего проката, основанный на компенсационной оптической конфигурации ЛДА и частотной следящей схеме первого поколения, был опробован на Новосибирском металлургическом заводе в 1984 году [59, 60]. Однако специфические требования эксплуатации в производственных условиях потребовали новых технических решений. Такие измерители были созданы, и первый из них (серии «Квазар М») на основе гелий-неонового лазера находится в круглосуточной эксплуатации в технологической линии на Новосибирском металлургическом заводе с 1987 года, а прибор серии «Альтаир» (на полупроводниковом лазере) – в опытной эксплуатации с 1988 года. Разработан функциональный ряд лазерных измерителей скорости и длины горячего проката (на основе газовых и полупроводниковых лазеров). Приборы успешно эксплуатируются на российских металлургических комбинатах и заводах [27, 61, 62].

Примером реализации оптических принципов в измерительной технике является фотометрический способ измерения линейных размеров [63], успешно опробованный в промышленных условиях при измерении поперечных размеров горячего металлургического проката.

В целом ситуацию, сложившуюся в области оптических методов исследования потоков, можно оценить как динамическую и плодотворную. Сферы приложения охватывают как фундаментальные, так и прикладные исследования [64–69]. Применение современной оптической и электронной элементной базы, включая полупроводниковые лазеры и оптико-волоконную технику, обеспечивает создание перспективных приборов, ориентированных на научные исследования в лаборатории и в натуральных условиях, в том



числе на земле, в атмосфере, океане и космосе, а также на метрологическое сопровождение разнообразных промышленных технологий.

Завершая этот краткий обзор работ, выполнявшихся с 1969 по 1987 год в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР, а с конца 1987 года — в Институте теплофизики СО РАН, хотелось бы отметить один из недавних результатов, который вписывается в диалектику развития науки. В работах [70, 71] впервые сообщалось о светодинамических эффектах в лазерной доплеровской анемометрии, состоящих в том, что результат измерения доплеровского сдвига частоты в свете, рассеянном частицей, зависит от воздействия на частицу зондирующих световых пучков.

На рис. 3 показаны в качестве примера значения измеренной скорости частиц дыма для различных отношений мощности лазерных пучков, формирующих зондирующее поле в дифференциальной схеме ЛДА на

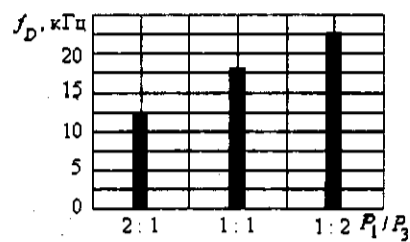


Рис. 3

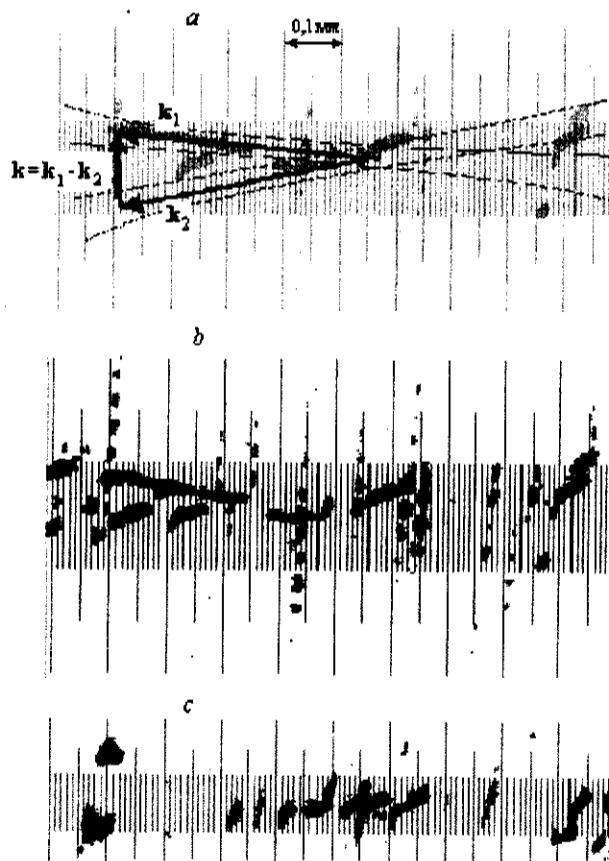


Рис. 4

встречных пучках. Для отношения 1 : 1 средняя частота  $f_D$ , соответствующая скорости конвекции дымовых частиц, равна 18 кГц ( $v = 4,64$  мм/с). В случаях, когда отношения мощностей пучков 2 : 1 и 1 : 2, среднее значение  $f_D$  изменяется, достигая соответственно величин 12,5 кГц ( $v = 3,22$  мм/с) и 22,5 кГц ( $v = 5,79$  мм/с).

На рис. 4 показаны треки частиц в зондирующем поле дифференциальной схемы ЛДА, образованном лазерными пучками, пересекающимися под углом  $2\theta \approx 16^\circ$  (рис. 4, а). Такая конфигурация зондирующих пучков обычна для практических измерений. Для оценки пространственных масштабов в поле зрения введено изображение линейки. На рис. 4, б точечные треки в вертикальном направлении соответствуют конвекционному движению частиц. Сплошные треки отображают движение частиц, вызванное светодинамическим воздействием. На рис. 4, в показан характерный пример крюкообразной формы треков. Такие треки иллюстрируют снос частиц из-за светодинамического эффекта при пересечении лазерных пучков. Влияние зондирующего поля может проявляться через световое давление либо фотофорез, являющийся следствием неоднородного нагрева лазерным лучом поверхности частицы и прилегающей среды. Отсюда следует, что в лазерной анемометрии встречаются ситуации, особенно при измерении малых скоростей, когда возмущением исследуемой среды под влиянием зондирующего поля нельзя пренебрегать и положение о «невозмущающем» характере измерений нарушается.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 96-02-12246).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пуанкаре А. О науке: Пер. с франц. М.: Наука, 1983.
2. Миронов В. Б. Основы применения периодических структур для измерения расхода // Метрология. 1983. № 11.
3. Brucker C. H. 3-D Scanning-particle-image-velocity: Technique and application to a spherical cap wake flow // Appl. Sci. Res. 1996. 56. P. 157.
4. Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. Н., Коронкевич В. П. и др. Лазерные доплеровские измерители скорости /Отв. ред. Ю. Е. Нестерихин. Новосибирск: Наука, 1975.
5. Durst F., Melling A., Whitelaw J. H. Principles and Practice of Laser-doppler Anemometry. London: Acad. Press, 1976.
6. Дюррани Т., Грейтил К. Лазерные системы в гидродинамических измерениях: Пер. с англ. /Отв. ред. А. И. Божков. М.: Энергия, 1980.
7. Дубнищев Ю. Н., Ринкевичюс Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982.
8. Rudd M. J. A new theoretical model for the laser Dopplermeter // J. Sci. Instrum. Ser. 2. 1969. N 1. P. 55.
9. Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. Н. Уменьшение уровня «постоянной» составляющей и шумов в выходном сигнале лазерного доплеровского измерителя скорости // Автометрия. 1972. № 5. С. 51.
10. Drain L. E. Coherent and noncoherent methods in Doppler optical beat velocity measurement // J. Phys. D. 1972. 5, N 3. P. 481.
11. Wang C. P. New model for laser Doppler velocity measurement of turbulent flow // Appl. Phys. Lett. 1971. 18, N 11. P. 522.

12. **Yeh Y., Cummins H. Z.** Localized fluid flow measurements with a He-Ne laser spectrometer // *Appl. Phys. Lett.* 1964. 4, N 10. P. 176.
13. **Goldstein R. J., Kreid D. K.** Measurement of laminar flow development in square duct using a laser-Doppler flowmeter // *J. Appl. Mech. Trans.* 1967. 34, N 4. P. 813.
14. **Дубнищев Ю. Н., Коронкевич В. П., Соболев В. С. и др.** Измерение скорости в потоке жидкости с использованием оптического эффекта Доплера // *Автометрия.* 1969. № 6. С. 115.
15. **Vasilenko Yu. G., Dubnistchev Yu. N., Koronkevich V. P. et al.** Laser velocity meter a comparative study // *Opt. and Laser Technol.* 1972. 6. P. 270.
16. **Ринкевичюс Б. С.** Применение ОКГ для определения скорости частиц в двухфазной струе методом гетеродинамирования // *Радиотехн. и электрон.* 1969. 14, № 10. С. 1903.
17. **Lehmann В.** Geschwindigkeitsmessung mit Laser-Dopplerfahren // *Wiss. Ber. AEG Telefunken.* 1968. 41, N 3. P. 141.
18. **Дубнищев Ю. Н., Ковшов Ю. М.** Лазерный доплеровский измеритель скорости, нечувствительный к геометрии падающего пучка // *Автометрия.* 1971. № 3. С. 87.
19. **Mazumder M. K., Wankum D. L.** SNR and spectral broadening in turbulence structure measurement using a CW-laser // *Appl. Opt.* 1970. 9, N 3. P. 633.
20. **Bossel H. H., Hiller W. J., Meier G. E.** Noisecancelling signal difference method for optical velocity measurements // *J. Phys. E.* 1972. 5, N 9. P. 893.
21. **Vasilenko Yu. G., Dubnistchev Yu. N.** Analysis of optical compensating schemes of laser Doppler velocimeters // *Opt. and Laser Technol.* 1974. 6, N 5. P. 225.
22. **Ватрушкин А. И., Дубнищев Ю. Н., Попова Т. Я.** Лазерный доплеровский измеритель скорости с компенсацией аддитивной составляющей помех и шумов // *Оптика и спектроскопия.* 1974. 36, № 6. С. 1184.
23. **Барнлл Г. А., Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. Н. и др.** Фурье-анализ оптических доплеровских устройств // *Автометрия.* 1973. № 5. С. 41.
24. **Dubnistchev Yu. N., Koronkevich V. P., Sobolev V. S.** Laser-Doppler-Geschwindigkeitsmesser LADO-1 // *Jenaer Rundschau.* 1978. 5. S. 222.
25. **Банен Р., Келлер К.** Лазерный доплеровский многокомпонентный анемометр на основе электрооптического модулятора // *Приборы для научн. исслед.* 1984. № 7.
26. **Belousov P. Ya., Dubnistchev Yu. N., Meledin V. G. et al.** Laser Doppler anemometry with adaptive temporal selection of the velocity vector // *Optica Applicata.* 1990. 20, N 3. P. 187.
27. **Дубнищев Ю. Н.** Развитие функциональных возможностей когерентно-оптических методов измерения скорости // *Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.* 1990. Вып. 4.
28. **Дубнищев Ю. Н.** Новые оптические методы исследования потоков газовых и конденсированных сред // *Автометрия.* 1994. № 3. С. 12.
29. **Dubnistchev Yu. N., Meledin V. G., Zhuravel F. A., Pavlov V. A.** Laser Doppler anemometry with selection of optical signal coherent component // *Optica Applicata.* 1987. 17, N 2. P. 71.
30. **Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н.** Лазерное устройство для измерения скорости движения поверхностей // *Квантовая электрон.* 1986. № 12. С. 2442.
31. **Buchhave P.** Three-component LDA measurements // *DISA Information.* 1983. 1, N 3.
32. **Dubnistchev Yu. N., Vasilenko Yu. G.** A laser Doppler velocimeter which measures the three components of velocity // *Opt. and Laser Technol.* 1976. 8, N 3. P. 129.
33. **Дубнищев Ю. Н.** Методы селекции вектора скорости в лазерной доплеровской анемометрии // *Автометрия.* 1996. № 2. С. 13.
34. **Белоусов П. П., Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н.** Оптико-волоконный лазерный доплеровский измеритель 2D вектора скорости // *Автометрия.* 1998. № 2. С. 8.
35. **Saffman.** Optical particle sizing using the phase of LDA signals // *Dantec Information.* 1987. N 5. P. 8.

36. **Adrian R. J., Orloff R. L.** Laser Doppler signal: visibility characteristics and application to particle size // *Appl. Opt.* 1977. **16**, N 3. P. 677.
37. **Дубнищев Ю. Н., Павлов В. А.** Лазерный метод измерения размера частиц // *Квантовая электроника*. 1996. **23**, № 9. С. 1.
38. **Dopheide D., Pfeifer H. J., Taux G., Faber M.** Multi component laser Doppler anemometers with high-frequency pulsed diode lasers // *Proc. Internat. Conf. on Fluid Dynamic Measurement and its Applications*. Beijing: Pergamon Press, 1989. P. 3.
39. **Jenthink H. W., de Mul F. F. M., Suichies H. E. et al.** Small laser Doppler velocimeter based on the self mixing effect in a diode laser // *Appl. Opt.* 1988. **27**, N 2. P. 379.
40. **Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н., Меледин В. Г.** Полупроводниковый лазерный излучатель для доплеровской анемометрии. Новосибирск, 1987. (Препр. /АН СССР. Сиб. отд-ние, ИАиЭ; 357).
41. **Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н., Меледин В. Г.** Оптический измеритель скорости на основе полупроводникового лазера // *Квантовая электроника*. 1988. **15**, № 3. С. 633.
42. **Дубнищев Ю. Н., Коронкевич В. П., Соболев В. С.** Лазерная интерферометрия. Новосибирск: Наука, 1983.
43. **Клочков В. П., Козлов Д. Ф., Потфкевич И. В. и др.** Лазерная анемометрия. Дистанционная спектроскопия и интерферометрия: Справочник /Под ред. М. С. Соскина. Киев: Наук. думка, 1985.
44. **Меледин В. Г.** Формирование и обработка сигналов в лазерных доплеровских измерительных системах: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук /СО РАН. Институт теплофизики. Новосибирск, 1996.
45. **А. с. 1525579 СССР.** Устройство для обработки сигнала лазерного доплеровского анемометра /Ю. Н. Дубнищев, В. Г. Меледин. Оpubл. 1989, Бюл. № 44. (Пат. РФ № 1525579, действует с 20.10.93).
46. **Belousov P. Ya., Dubnistchev Yu. N., Stolpovsky A. A.** The application of an electrooptical frequency modulator with a rotating electric field in optical Doppler velocimeter // *Opt. and Laser Technol.* 1977. **9**, N 1. P. 31.
47. **Kreid D. K.** Laser-Doppler velocimeter measurements in nonuniform flow: error estimates // *Appl. Opt.* 1974. **13**, N 8. P. 1872.
48. **Rudd M. J.** The velocity measurement of phase objects // *Opto-Electronics*. 1972. N 4. P. 441.
49. **Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. Н., Скурлатов А. И.** Оптический метод измерения скорости движения сред с фазовыми неоднородностями // *Письма в ЖТФ*. 1977. **3**, № 19. С. 995.
50. **Arbuzov V. A., Belousov P. Ya., Dubnistchev Yu. N. et al.** Optical system for measuring velocity and for visualization of flows structure // *Multiphase Flows: Proc. of Int. Conf.* Tsukuba: University of Tsukuba, 1991.
51. **Arbuzov V. A., Dubnistchev Yu. N.** Real-time coloured visualization of phase flows by the slieren method // *Opt. and Laser Technol.* 1991. **23**, N 2. P. 118.
52. **Арбузов В. А., Дубнищев Ю. Н., Лебедев А. В. и др.** Наблюдение крупномасштабных гидродинамических структур в вихревой трубке и эффект Ранка // *Письма в ЖТФ*. 1997. **23**, № 23. С. 84.
53. **Belousov P. Ya., Dubnistchev Yu. N.** The application of an optical Doppler frequency discrimination in a laser velocimeter // *Opt. and Laser Technol.* 1977. **9**, N 5. P. 229.
54. **Дубнищев Ю. Н., Попова Т. Я.** Пространственно-частотные резонансы в нелинейно-поглощающей ячейке // *Письма в ЖТФ*. 1978. **4**, вып. 9. С. 526.
55. **Белоусов П. Я.** Измеритель локальной скорости на основе сканирующего ОЧД // *Автометрия*. 1982. № 3. С. 107.
56. **Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. П., Пальчикова И. Г.** Визуализация поля скорости // *Оптика и спектроскопия*. 1982. **52**, № 5. С. 876.

57. **Belousov P. Ya., Dubnistchev Yu. N., Meledin V. G.** Optical velocimeters for surfaces using gas and semiconductor lasers // Opt. and Laser Technol. 1990. N 6. P. 335.
58. А. с. 1610438 СССР. Устройство для измерения скорости и длины объекта /Ю. Н. Дубнищев, В. Г. Меледин. Оpubл. 1990, Бюл. № 4.
59. **Артамонов В. Ф., Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н. и др.** Лазерный доплеровский измеритель скорости горячего проката // Сталь. 1986. № 28. С. 65.
60. **Дубнищев Ю. Н.** Зачем лицензии, когда есть свои разработки // ЭКО. 1987. № 1.
61. **Laser Devices for the Speed and Length Control and Rolling in Metallurgy.** Novosibirsk: Vortex Technologies, 1995. P / N 9500001.
62. **Бакакин Г. В., Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н. и др.** Способ оптического измерения металлургических изделий // Оптический журн. 1996. 10, № 1. С. 7.
63. **Бакакин Г. В., Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н. и др.** Фотометрический способ измерения линейных размеров // Автометрия. 1997. № 4. С. 23.
64. **Богатырев В. Я., Дубнищев Ю. Н., Накоряков В. Е. и др.** Экспериментальные исследования течения в траншее // ПМТФ. 1976. № 2. С. 76.
65. **Дубнищев Ю. Н., Евсеев А. Р., Соболев В. С. и др.** Исследование газонасыщенных турбулентных потоков с применением лазерного доплеровского измерителя скорости // ПМТФ. 1975. № 1. С. 147.
66. **Кузнецов Е. А., Львов В. С., Соболев В. С. и др.** О проблеме перехода к турбулентности в течении Куэтта // Письма в ЖЭТФ. 1979. 30, № 4.
67. **Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н., Евсеев А. Р.** Исследование характеристик ламинарно-турбулентного перехода многоканальным лазерным анемометром // Автометрия. 1982. № 2. С. 4.
68. **Dubnistchev Yu. N.** Laser velocimeters for scientific and industrial application. Новосибирск, 1990. (Препр. /АН СССР. Сиб. отд-ние, Институт теплофизики; 24).
69. **Arbuzov V. A., Belousov P. Ya., Dubnistchev Yu. N. et al.** Optic methods of flow studies by selecting of the spatial-temporal structure of the scattered light // Proc. SPIE. 1996. 2773. P. 147.
70. **Дубнищев Ю. Н., Павлов В. А.** Фотодинамические эффекты в лазерной доплеровской анемометрии // Письма в ЖТФ. 1998. 24, № 17. С. 54.
71. **Дубнищев Ю. Н., Павлов В. А.** Светодинамические эффекты в лазерной доплеровской анемометрии // Квантовая электрон. 1998. 25, № 8. С. 761.

*Поступила в редакцию 21 сентября 1998 г.*