

УДК 681.78: 533.6.08

Н.В. Семидетнов, С.Ф. Юрас

Государственный морской технический университет,  
Россия, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3,  
E-mail: [n.semidetnov@mail.ru](mailto:n.semidetnov@mail.ru), [sfjuras@mail.ru](mailto:sfjuras@mail.ru)

## ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА В ОБРАТНОМ РАССЕЯНИИ С ПОМОЩЬЮ ЛДА НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНО-ДИОДНОГО МОДУЛЯ С АВТОГЕТЕРОДИНИРОВАНИЕМ СИГНАЛА

*Несмотря на то, что лазерный доплеровский анемометр с внутриврезонаторным приемом и автогетеродинамированием сигнала имеет ряд недостатков по сравнению с традиционным ЛДА, некоторые его достоинства становятся исключительно важными при специфических условиях измерений. В работе рассмотрена конструкция, основные технические характеристики и особенности применения двухкомпонентного датчика ЛДА зондового типа на основе лазерного модуля в условиях высокотемпературного потока воздуха конвективного характера. Датчик применяется при испытаниях крупномасштабной модели контейнента АЭС с целью верификации результатов численного моделирования.*

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ, ВОЗДУШНЫЙ ПОТОК, ЛДА, АВТОГЕТЕРОДИНИРОВАНИЕ,  
ОБРАБОТКА СИГНАЛА, КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

### ВВЕДЕНИЕ

При измерении скорости потока воздуха в крупногабаритных аппаратах энергетики в условиях повышенных температур и влажности, или, например, при исследовании конвективного теплообмена внутри помещений большого объема с высокими температурами применение имеющихся на рынке оптических измерительных систем скорости потока не приводит к простому решению измерительной задачи. Особенно сложно организовать при этих условиях измерение поля скорости потока. Примером таких измерений может служить задача исследования конвективного течения воздуха в модели контейнента АЭС [1]. К характерным особенностям объекта исследования относятся следующие:

- большая площадь исследуемой зоны потока,
- высокая температура воздуха внутри помещения, достигающая 120°C,
- недопустимость потерь тепла и нарушения термоизоляции помещения,
- сложность организации оптического доступа в помещение.

Обычно задача измерения поля скорости эффективно решается при использовании анемометра изображений частиц (АИЧ) [2]. Однако, например, при измерении поля скорости в зоне потока большей по площади  $0,2 \div 0,3 \text{ м}^2$  не удастся осуществить измерение из одной установочной конфигурации даже при использовании импульсных лазеров большой мощности. Следовательно, требуется траверсирование исследуемой зоны потока, перемещением осветительной и приемной частей системы. При невозможности разместить аппаратуру внутри помещения из-за высокой температуры и затрудненном оптическом доступе извне применение АИЧ представляется трудно осуществимым.

При использовании, например, стандартной дифференциальной схемы ЛДА [3] задача измерения поля скорости стационарного потока обычно решается также с использованием траверсирования. Измерения выполняются последовательно от точки к точке изменяемой при перемещении платформы с оборудованием. Условия измерений на стенде обуславливают расположение всех элементов системы за пределами помещения. При этом также требуется обеспечить обширное окно оптического доступа, что недопустимо из-за потерь тепла. Реализация многоточечных измерений с помощью набора систем ЛДА в классическом исполнении встречает аналогичные трудности.

В то же время, многоточечные измерения в зондовом варианте можно реализовать на основе набора малогабаритных охлаждаемых измерительных модулей ЛДА, построенных с использованием лазерно-диодных модулей.

## **ЛДА НА БАЗЕ ЛАЗЕРНО-ДИОДНОГО МОДУЛЯ**

Наиболее компактной измерительной системой на основе лазерного диода является ЛДА с автогетеродинным приемом сигнала, которая работает в обратно рассеянном излучении. Эту систему также называют системой с внутрिलाзерной регистрацией или интерферометром с оптической обратной связью [4, 5]. Система основана на полупроводниковом лазерном модуле, который содержит излучающий лазерный диод и приемный фотодиод. Определяющими достоинствами в этом случае являются, прежде всего, малые габариты приемно-излучающего модуля, простота настройки системы, высокая чувствительность внутривибраторного приема. Эти характеристики прибора позволяют при измерениях крупномасштабных потоков использовать его в зондовом варианте.

Слабое излучение, рассеянное освещенной лучом лазера частицей, попадает в резонатор полупроводникового лазера и инициирует когерентное вынужденное излучение на новой частоте. Излучение лазера на смещенной частоте, попадая на частицу, опять испытывает доплеровский сдвиг, что приводит к появлению в излучении лазера третьей частотной составляющей и так далее. В общем случае спектр излучения лазера при этом содержит набор спектральных составляющих, смещенных на величину доплеровского сдвига. Приемный фотодиод модуля работает как детектор биений, выделяя разностные частоты составляющих в соответствии с принципом фотогетеродинирования. При этом выходной сигнал фотоприемника является радиоимпульсом, который содержит доплеровскую составляющую на частоте основной гармоники разностной частоты. В отличие от классического ЛДА доплеровская составляющая в общем случае не гармоническая, а имеет пилообразную форму. Для определения скорости частицы достаточно измерить частоту основной гармоники сигнала.

## **РАЗРАБОТКА ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ДАТЧИКА СКОРОСТИ**

При разработке датчика-анемометра зондового типа для измерения двух компонент вектора скорости на базе лазерного модуля необходимо решить следующие задачи:

- обеспечить локальность измерения скорости;
- выбрать способ измерения двух проекций вектора скорости;
- решить вопрос об определении направления (знака) скорости;
- обеспечить работоспособность датчика при температуре до 120°C;
- минимизировать влияние зонда на поток (малые габариты);
- разработать конструкцию датчика;
- экспериментально оценить характеристики датчика.

Измерительный объем разрабатываемого ЛДА оптически не детерминирован в такой сильной степени как у традиционного ЛДА. Тем не менее, глубина оптической обратной связи и амплитуда доплеровского сигнала в сильной степени зависят от размеров частицы и плотности потока излучения на ее поверхности [4]. Поэтому, применив сильно сфокусированный лазерный пучок и пороговую селекцию сигналов в аппаратно-

программной части обработки сигнала, можно ограничить эффективную величину измерительного объема.

Техническим заданием предусмотрено измерение двух ортогональных проекций вектора скорости. В условиях стационарного потока в общем случае можно применить как последовательное во времени, так и одновременное измерение проекций. В первом случае, используется одна единственная измерительная система, и направление чувствительности схемы изменяется за счет изменения ее ориентации. В рассматриваемом случае это невозможно из-за ограниченного доступа в помещение во время эксперимента. При одновременном измерении ортогональных компонент естественно было бы использовать прямой способ их измерения и расположить два ЛДА ортогонально друг другу. Однако, при зондовом варианте многоточечных измерений система преобразователей скорости становится слишком громоздкой, что может привести к существенным искажениям потока. При косвенном измерении компонент вектора скорости конструкция датчика становится более компактной и позволяет достаточно просто организовать охлаждение преобразователей скорости.

Как известно, сигнал ЛДА с автогетеродинным приемом в общем случае содержит информацию не только о величине, но и о направлении скорости. Эта информация заключена в форме сигнала, а именно, в соотношении углов наклона восходящей и нисходящей ветви пилообразного выходного сигнала. При измерении скорости конвективного потока воздуха требуется определить не только величину, но и знак проекции вектора скорости.

### **Конструкция датчика**

Итак, датчик на основе лазерного полупроводникового модуля разрабатывался на основе следующих положений:

- сильная фокусировка лазерного пучка и, следовательно, относительно небольшое расстояние точки измерения от модуля;
- измерение двух различно направленных компонент скорости в заданной точке потока с помощью двух первичных преобразователей – двухканальный датчик скорости;
- водяное охлаждение первичных преобразователей скорости,
- определение знака (направления) проекции скорости
- усилительно-согласующая электроника на линии связи первичного датчика и аппаратуры обработки сигнала,
- минимизация габаритов датчика.

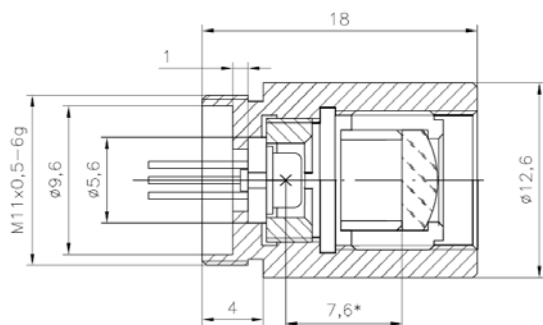


Рис. 1. Оптическая часть преобразователя ЛДА

В результате проработки различных конструктивных вариантов первичного преобразователя выбраны наиболее простые решения, требующие минимального количества заказных механических деталей. На рис. 1 приведен чертеж оптической части разработанного первичного преобразователя скорости на основе полупроводникового лазерного модуля.

Оптическая часть преобразователя содержит лазерный модуль и фокусирующую линзу. Лазерный модуль состоит из излучающего лазерного диода и оптически связанного и согласованного с ним фотодиода. Параметры лазерного модуля приведены в таблице.

Таблица 1 Характеристики лазерного модуля

Тип корпуса	Температура хранения	Выходная мощность	Рабочий ток	Длина волны	Расходимость излучения
	°С	мВт	мА	нм	$\theta_{\text{верт}}/\theta_{\text{гор}}$
ТО-18	-10...+70	90	115	785	9/17

Фокусировка луча лазера в рабочую точку осуществляется с помощью линзы фокусным расстоянием 7,5 мм. Форма сечения пучка на выходе модуля эллиптическая с соотношением осей 1:2. Размер сечения пучка на расстоянии 80мм оценивается величиной 75 мкм × 150 мкм.

Напряжение сигнала на нагрузке фотодиода усиливается с помощью предварительного усилителя, согласованного по выходу с волновым сопротивлением кабеля. Усилитель имеет коэффициент усиления 4 и размещен в цилиндрическом корпусе, присоединенном с помощью резьбового соединения к корпусу оптической части. Питание модуля осуществляется от внешнего стабилизированного блока питания напряжением 5В.

### Обеспечение теплового режима лазерно-диодного модуля

Применение модуля в помещении с высокой температурой требует организации тепловой защиты и отвода собственного тепла, выделяемого элементами преобразователя. Поддержание постоянной температуры преобразователя важно не только с точки зрения его защиты, но и для обеспечения постоянства длины волны лазера. Проблема водяного охлаждения датчика решается следующим образом: два отрезка тонкостенной медной трубки внутренним диаметром 13,2 мм припаяны к несущей медной трубке, которой придана форма

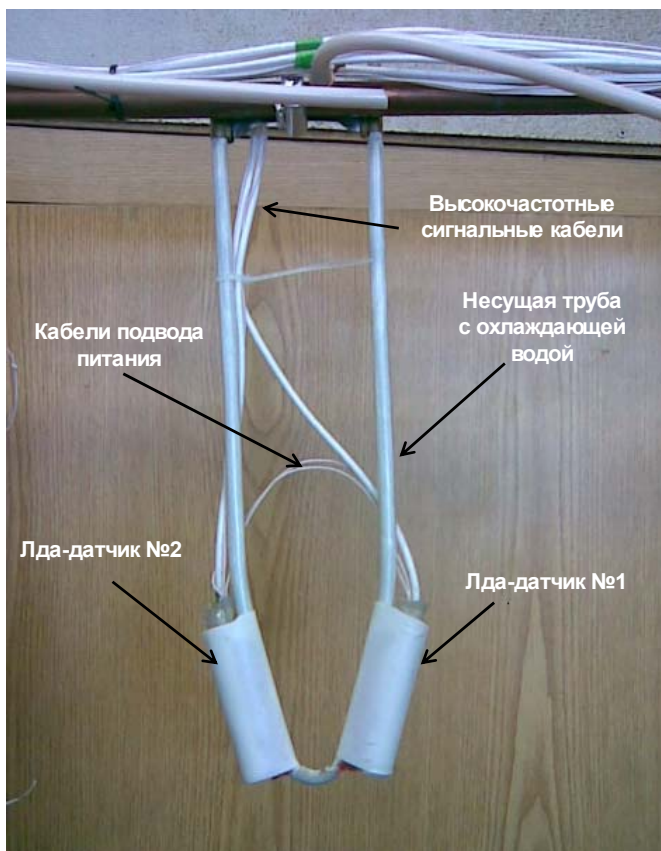
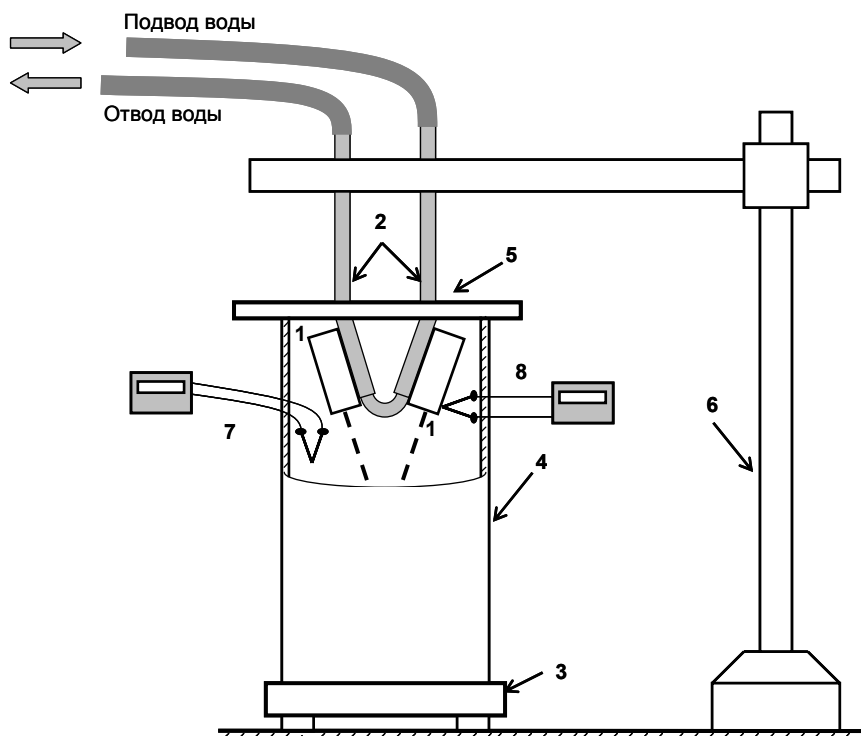


Рис. 2. Конструкция двухкомпонентного датчика

в соответствии с выбранными направлениями пучков излучения лазеров. Через несущую трубку прокачивается охлаждающая вода от системы водоснабжения. Таким образом, тепло внешней среды, нагревающее датчик извне и его собственное тепло через медные трубки передаются охлаждающей воде. Конструкция двухкомпонентного датчика показана на рис. 2.

Внешняя поверхность всех несущих и теплоотводящих элементов покрыта защитным покрытием с низкой теплопроводностью, в качестве которого используется теплоизоляционная краска «Корунд». Результаты расчета показали, что для условий эксперимента достаточным является однослойное покрытие толщиной 0,5мм.

Для проверки эффективности охлаждения выполнены испытания макетного образца датчика при температуре окружающей среды свыше 100°С. Схема испытательного стенда приведена на рис. 3.



1 – преобразователь скорости,  
 2 – несущая труба с охлаждающей водой, 3 – электронагреватель, 4 – теплоизолированный цилиндр,  
 5 – крышка цилиндра, 6 – стойка крепления датчика, 7 – термopара (воздух),  
 8 – термopара (поверхность датчика)

Рис. 3. Установка для оценки эффективности охлаждения

Испытания выполнялись при различных расходах охлаждающей воды. Расход измерялся объемным методом.

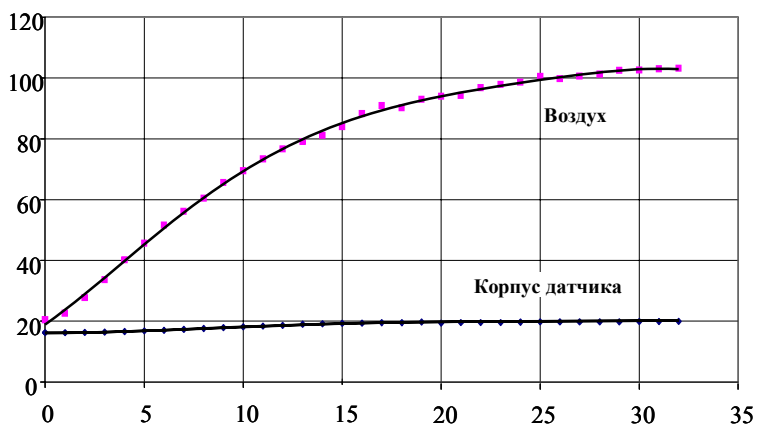


Рис. 4. Изменение температуры датчика при нагреве окружающей среды

На рис. 4 показана зависимости температур воздуха и корпуса датчика при расходе воды 83 мл/сек и температуре воды 18 градусов.

Как показали результаты экспериментов, вполне достаточно обеспечить расход воды около 50 мл/сек. При этом повышение температуры корпуса датчика не превысит 3,5 градусов Цельсия.

### Обработка сигналов многоточечной системы ЛДА

Учитывая высокие затраты на создание специализированной аппаратуры, обработку сигнала целесообразно осуществить с помощью выпускаемых промышленностью устройств широкого применения. С учетом преимуществ компьютерных методов, имеющегося опыта и результатов макетных испытаний для обработки сигнала выбрана цифровая обработка в спектральной области на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ).

При длине волны использованного лазера  $\lambda = 0,78$  мкм и при заданной максимальной скорости потока в 1 м/с оценочное значение доплеровской частоты  $f_d \approx 2,6$  МГц. В соответствии с теоремой Найквиста-Котельникова частота дискретизации аналогового сигнала должна как минимум в 2 раза превышать измеряемую частоту. Обычно ее принимают больше в 3 ÷ 4 раза. Это дает оценку минимального значения частоты дискретизации аналогового сигнала примерно 10 МГц. Принимая разрядность АЦП равной 12 бит, получаем скорость генерации информации равную 120 Мбит/с.

Аналого-цифровые преобразователи, работающие на линии связи с ПК сегодня коммерчески доступны в двух вариантах: в приборном исполнении или в виде компьютерной карты, устанавливаемой на шине компьютера. Устройства в приборном исполнении снабжены обычно последовательным интерфейсом RS 232 или USB. Передача больших объемов информации через эти интерфейсы требует значительного времени, поэтому предпочтительным является применение компьютерной карты на шине PCI.

Основными критериями выбора АЦП в рассматриваемом случае являются:

- частота дискретизации более 10 МГц (предпочтительно 15÷20 МГц);
- одновременно оцифровка пары сигналов (пара синхронных АЦП);
- промежуточной буферизации отсчетов – необходима буферная память;
- диапазон частот до 10 МГц.

В случае применения индивидуального АЦП для каждого из датчиков многоточечной системы измерения существенно увеличивается стоимость, поэтому использована многоканальная система с централизованным АЦП и быстродействующим коммутатором. Окончательно выбран отечественный модуль аналого-цифрового преобразования типа ADM212x40M в комбинации с базовым модулем шины PCI - AMBPCM.

Модуль *ADM212x40M* предназначен для аналого-цифровой регистрации широкополосных сигналов (до 40 МГц) и последующей записи оцифрованных сигналов в ОЗУ ПЭВМ или на дисковый накопитель. В таблице 3 представлены основные технические характеристики модуля.

Таблица 2. Технические характеристики АЦП

Разрядность	12 бит
Количество АЦП	2
Количество входов на один АЦП	8
Максимальная частота дискретизации	40 МГц
Входное сопротивление ( $R_{вх}$ )	50 Ом
Коэффициенты усиления (программируемые)	1, 2, 4, 8
Шкала преобразования	$\pm 2,5$ В
Максимальная скорость мультиплексирования	10 МГц
Объем буферной памяти	1 Мбайт

Драйвер модуля обеспечивает программирование режимов работы АЦП, запись оцифрованного сигнала в буферную память и передачу данных в ОЗУ компьютера. Для организации измерений, программирования АЦП, регистрации сигналов по 36 каналам измерения и обработки сигналов разработано программное обеспечение измерительной системы.

## Программное обеспечение

Программное обеспечение системы измерения скорости является интерфейсом между оператором и измерительной системой и решает следующие задачи:

- конфигурирование подключения датчиков;
- тестирование каналов измерения и оценка параметров сигнала;
- первичное задание параметров каналов аналого-цифрового преобразования (усиление, частота дискретизации);
- автоматический поиск сигналов, оценка его вероятной частоты и выбор соответствующих параметров регистрации и обработки;
- задание режима измерений (однократно/периодически и т.п.);
- регистрация сигналов датчиков по 36 каналам и сохранение в буферной памяти;
- передачи массивов данных в ЭВМ
- обработка сигналов по каналам определение первичных частот (скоростей) по каналам;
- обработка полученных данных с целью нахождения вертикальной и горизонтальной составляющей скорости в точке регистрации;
- оперативное представление оператору информации о течении процесса измерения;
- запись результатов измерения в файл для последующего анализа;
- разработка интегрированной интерфейсной среды система-оператор.

Наиболее проблемными моментами, требующими значительных усилий по разработке алгоритмов и их реализации, являются следующие: обнаружение доплеровских импульсов от частиц в сигнале, алгоритм их обработки и оценки достоверности. Другие задачи при их реализации требуют в основном значительных затрат времени, но достаточно тривиальны.

Возможны два основных способа организации измерений: программный поиск полезного доплеровского импульса в реализации сигнала большой длины (непрерывная регистрация, программный запуск измерений) или аппаратно-программный поиск сигнала – при ждущем запуске АЦП. На первом этапе разработки в качестве основного режима работы выбран режим программного запуска АЦП, при котором требуется обеспечить большую концентрацию частиц-трассеров в исследуемом потоке. На практике достаточную концентрацию обеспечить не удалось, поэтому был использован режим триггерного запуска и сегментация памяти для накопления заданного числа сигналов.

На основании выполненных исследований алгоритмов обработки одиночного доплеровского импульса выбран алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 5.

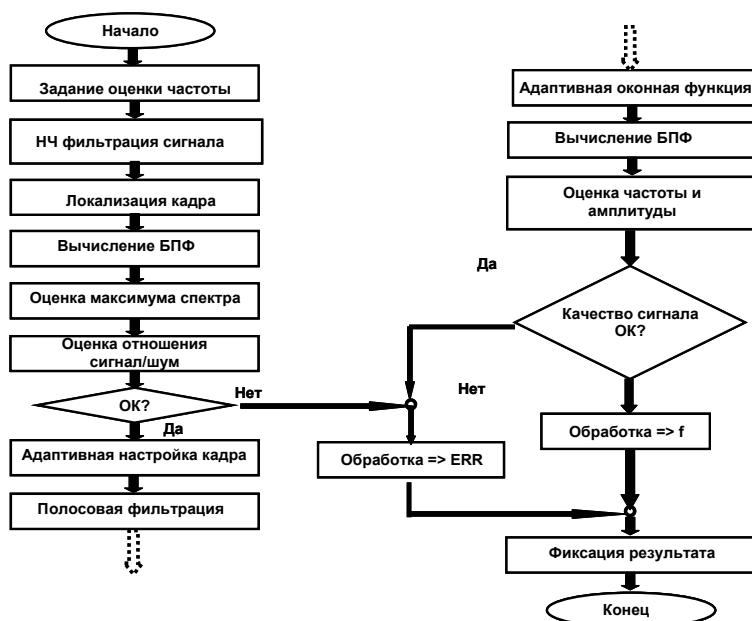


Рис. 5. Алгоритм обработки доплеровского импульса

Этот алгоритм обеспечивает относительную погрешность определения доплеровской частоты сигнала не более 0,5 % при отношении сигнал/шум порядка 6 дБ (по мощности в полосе сигнала). Частота дискретизации при этом должна обеспечивать регистрацию не менее чем 7 точек на период, а число периодов доплеровского сигнала не менее 6.

## ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СКОРОСТИ

Как известно, характеристики полупроводниковых лазеров с точки зрения стабильности и качества излучения существенно хуже, чем у газовых лазеров, обычно используемых в лазерной анемометрии. Прежде всего, следует отметить зависимость длины волны от температуры, которая может привести к существенной погрешности измерения скорости. В случае многоточечной системы использование температурной стабилизации приводит к увеличению размеров датчика, и существенно удорожает систему. Следовательно, требуется оценить влияние нестабильности температуры на длину волны и, соответственно на погрешность измерения скорости. Далее, пучок излучения лазерного диода не является гомоцентрическим гауссовым пучком, и имеет астигматизм, который приводит к различному положению перетяжек во взаимно перпендикулярных плоскостях пучка. Они имеют разный размер и расположены на различном расстоянии от фокусирующей линзы. Применение асферических линз решает эту проблему, однако также приводит к значительному увеличению стоимости. Наконец, важной характеристикой ЛДА является размер измерительного объема, из которого извлекается информация о скорости.

Характеристики разработанного датчика скорости потока устанавливались экспериментальным путем при испытаниях в лаборатории. Испытания выполнялись с помощью задатчика скорости в виде вращающегося диска с частицей, установленной на его периферии, и выходящей за границу диска. Таким образом, частица пересекает свободно распространяющийся в пространстве луч лазера. В электроприводе диска применена фазовая автоподстройка частоты вращения, а кратковременные колебания частоты сглаживаются за счет массы диска составляющей порядка одного килограмма. Выполненные с помощью традиционного ЛДА измерения позволили установить, что коэффициент вариации линейной скорости поверхности диска не превышает 0,17%.

При испытаниях измерялась частота доплеровского сигнала, полученного от частицы пересекающей пучок излучения под углом около  $30^\circ$  к оси пучка. На рис. 6а приведен

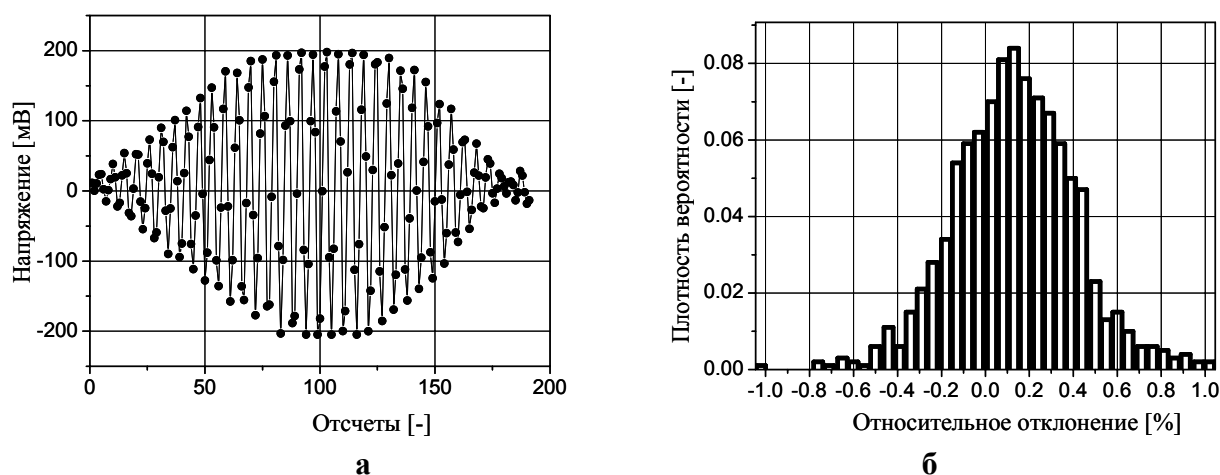


Рис. 6. Исследование характеристик ЛДА **а** – сигнал, **б** – плотность вероятности отклонения от среднего

типичный сигнал лазерно-диодного ЛДА с автогетеродинированием сигнала, полученный при указанных условиях, а на рис. 6б график плотности вероятности отклонения измеренной частоты от среднего значения.



Объем выборки составил 1000 сигналов при общей длительности измерения порядка 30 минут. Среднее значение частоты 906488,28 Гц, температура окружающей среды 21°C. Как видно из графика, ЛДА демонстрирует вполне приемлемую повторяемость результатов измерения на краткосрочном интервале – коэффициент вариации представленных результатов составил 0,61%. Измерения, выполненные с интервалами 3, 7 и 24 часа, дали результаты, коэффициент вариации которых не превысил 0,7%.

На рис. 7 приведены результаты исследования влияния температуры датчика (лазера) на измеряемую частоту доплеровского сигнала. Температура датчика (рис. 2) изменялась за счет изменения температуры воды в системе охлаждения. Вода подавалась от бытового смесителя системы центрального водоснабжения, а температура корпуса датчика контролировалась с помощью термодатчика.

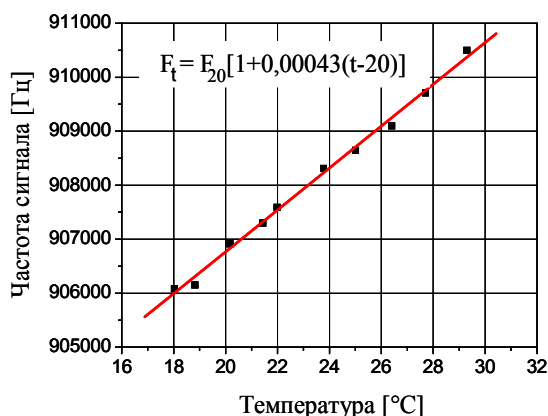


Рис. 7. Влияние температуры датчика

Влияние температуры определялось по результатам измерения доплеровской частоты в вышеописанной установке. Значения на графике получены как среднее арифметическое по выборке 250 результатов. Аппроксимация полученных точек по методу наименьших квадратов дает уравнение зависимости частоты от температуры, приведенное в поле графика. Значение частоты при 20°C равнялось 906765,1 Гц. Таким образом, изменение

длины волны излучения лазера можно оценить значением 0,043 %/°C, или 0,335 нм/°C.

Очень большое значение имеет определение пространственного разрешения ЛДА. Наиболее простым способом ограничения пространственного разрешения в случае ЛДА с самосмещением служит амплитудная селекция сигналов от частиц в аппаратной и (или) программной частях аппаратуры обработки сигнала. При регистрации сигнала в режиме ждущего триггера представляется возможным осуществить такую фильтрацию выбором соответствующего уровня запуска. А при дальнейшей программной обработке осуществить дополнительную селекцию сигналов по максимуму амплитуды и числу периодов в сигнале. Обе возможности в существенной степени связаны с распределением мощности излучения в поперечном сечении и по оси пучка. В направлении перпендикулярном оси пучка разрешение может быть достаточно велико, так как в поперечном сечении распределение интенсивности определяется соответственно функциями Гаусса и Лоренца. Оценка пространственного разрешения на уровне  $e^{-2}$  приведена выше.

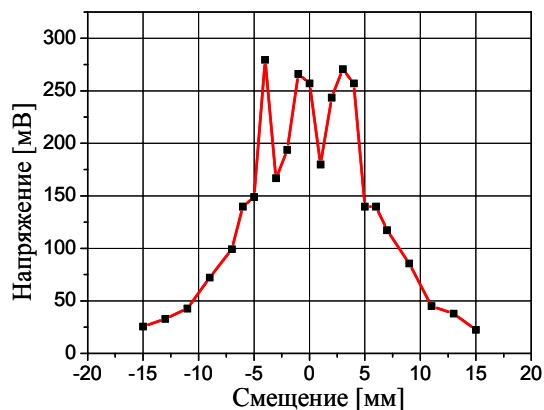


Рис. 8. Оценка пространственного разрешения

В то же время, в направлении оси пучка разрешение значительно меньше. Экспериментальная оценка пространственного разрешения выполнялась измерением амплитуды доплеровского сигнала в максимуме при различных смещениях частицы, генерирующей сигнал, вдоль оси пучка. На рис. 8 приведена зависимость амплитуды сигнала в максимуме от относительного перемещения частицы и условной перетяжки пучка. В связи с затруднениями по определению положения перетяжки положение нуля на оси абсцисс

определялось апостериори симметрированием зависимости относительно нуля.

Отметим резкие колебания амплитуды сигнала вблизи условной перетяжки пучка. Эти колебания связаны, по-видимому, с особенностями распределения интенсивности в районе фокуса пучка лазерного диода без коррекции. В то же время, график демонстрирует достаточно сильное падение амплитуды сигнала при смещениях превышающих 7 мм. Таким образом, установив уровень запуска, например, 75 мВ можно ограничить измерительный объем в направлении оси пучка величиной на уровне  $\pm 10$  мм. Однако, для дальнейшей обработки сигнала в программном модуле требуется не менее 6 периодов сигнала, поэтому следует выбрать меньшее значение уровня запуска. Итак, при практическом измерении скорости потока воздуха, несущего искусственные рассеиватели, предварительно оценивалась максимальная амплитуда сигнала, и выбирался уровень запуска триггера на уровне порядка  $12 \div 15$  % от максимума. При этом предполагается, что размер измерительного объема в направлении оси пучка не превысит  $\pm 15$  мм. При исследовании крупномасштабных конвективных течений в помещениях большого объема такое пространственное разрешение представляется допустимым. Естественно, такая оценка является приближенной, поэтому в дальнейшем требуется дополнительное исследование этого параметра, например, при измерении потока воздуха, истекающего из щелевого канала.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАКА ПРОЕКЦИИ СКОРОСТИ

Применение лазерно-диодного ЛДА и оптической обратной связью для исследования знакопеременных конвективных течений требует решения проблемы дискриминации знака скорости относительно направления распространения пучка. Как известно, при определенных условиях информация о скорости уже имеется в сигнале, полученном от частицы. Это является следствием оптической обратной связи в лазерно-диодном ЛДА с внутрирезонаторным приемом. За счет обратной связи при приеме обратно рассеянного излучения лазер генерирует на частотах смещенных относительно основной частоты на величину доплеровского сдвига. В результате сигнал приобретает пилообразную форму с различным наклоном восходящей и падающей ветвей. На рис. 9 приведены сигналы ЛДА,

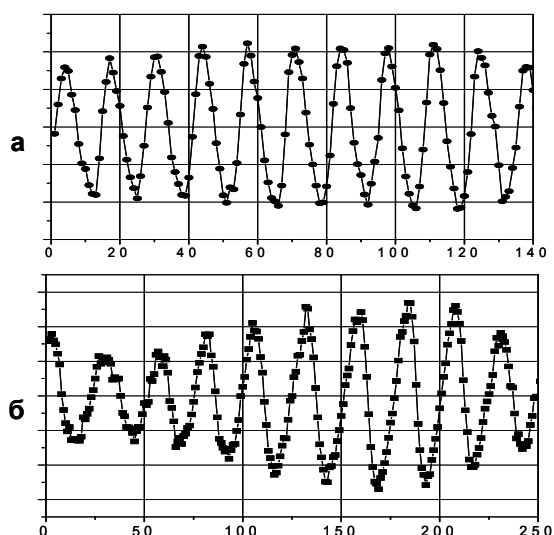


Рис. 9. Модификация формы сигнала при изменении знака скорости

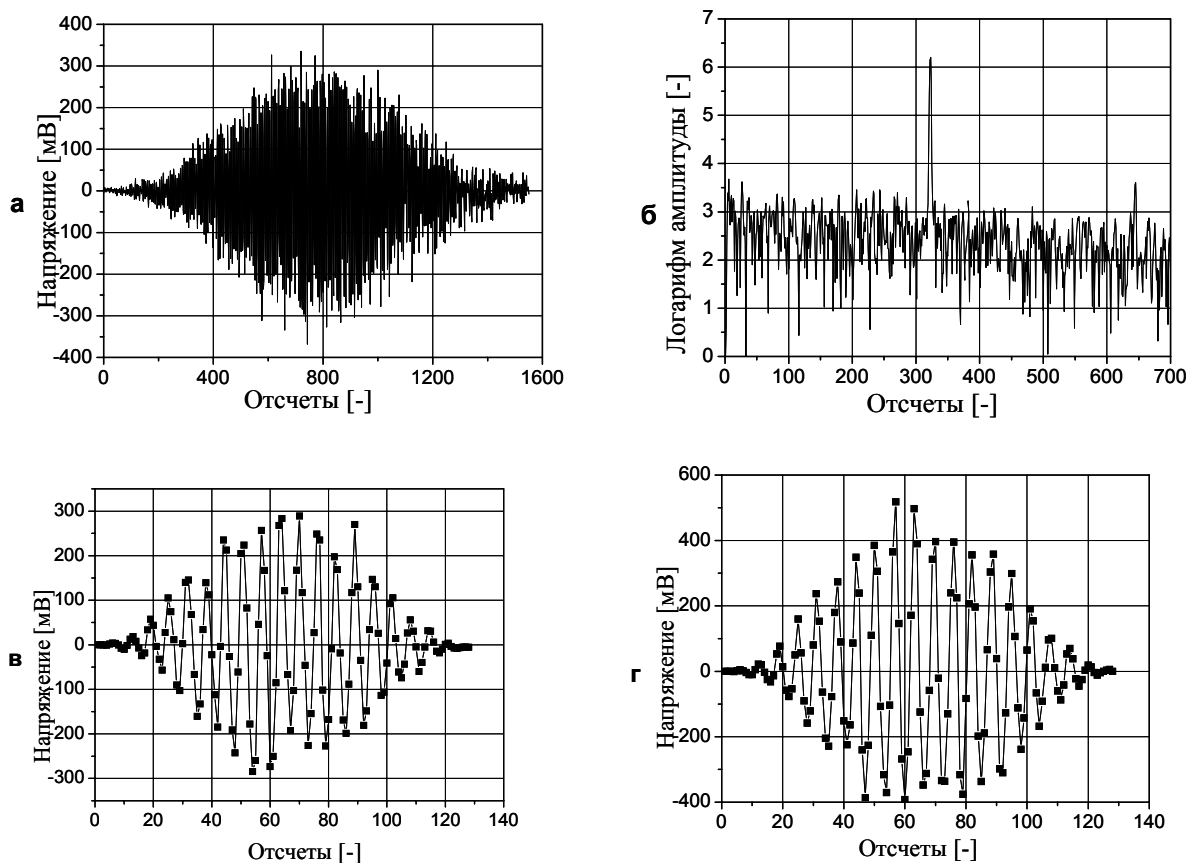
полученные от поверхности вращающегося диска при различном направлении его вращения.

Дискриминацию формы сигнала можно выполнить различными способами. Фактически необходимо обнаружить разницу наклона восходящей и падающей ветвей сигнала. Исследовались следующие возможности:

- анализ амплитудного спектра сигнала,
- анализ фазового спектра сигнала,
- анализ отношения углов наклона ветвей,
- анализ амплитудной асимметрии первой разности (производной) сигнала,
- анализ амплитудной асимметрии сигнала после цифровой фильтрации с помощью ФВЧ.

Исследования производились методом математического моделирования сигнала и алгоритма его обработки на ПК. Результаты исследования заслуживают отдельной публикации, поэтому здесь приведем краткие выводы. К сожалению, анализ сигнала в частотной области не обнаружил наличия надежных критериев дискриминации наклона

пилы, ни по спектру амплитуд, ни по спектру фаз. Отношение углов наклона ветвей пилы по производной в районе пересечения нулевой линии можно использовать для решения задачи, однако, только при отношениях сигнал/шум более 15 – 18 дБ и большом числе точек дискретизации на период. Наиболее эффективными и сравнимыми по эффективности оказались два последних способа обнаружения смещения вершины пилы (его направления). На рис. 10 проиллюстрировано применение дифференцирования сигнала на диаграммах реального сигнала, полученного в условиях испытаний модели контейнента АЭС.



а) оцифрованный сигнал, б) энергетический спектр, в) фрагмент сигнала для обработки, г) сигнал после дифференцирования

Рис. 10 Дискриминация направления скорости при обработке экспериментального сигнала

На рис. 10а изображен экспериментальный сигнал, зарегистрированный в ждущем режиме при уровне запуска 160 мВ. Хорошо виден заметный вклад шумов, которые вызываются сигналами от частиц за пределами измерительного объема и шумами усилителей. На рисунке 10б показана оценка энергетического спектра сигнала. Видно наличие основной и второй гармоники основной частоты сигнала, которая свидетельствует о пилообразной форме сигнала. Рисунок 10в иллюстрирует фрагмент сигнала, выбранный для обработки из зоны сигнала максимальной амплитуды. Сигнал имеет гауссову огибающую, которая получена умножением сигнала на соответствующую нормирующую функцию. Заметим, что пилообразная форма сигнала визуально обнаруживается с большим трудом, но после дифференцирования сигнала (рис.10г) явно видна несимметричность амплитуд. Если для сигнала до дифференцирования отношения положительного максимума к отрицательному составляло 0,94, то после дифференцирования отношение стало 1,32, и изменилось в 1,4 раза. Чувствительность метода и надежность дискриминации в условиях шумов можно несколько повысить, если после дифференцирования использовать медианный фильтр.

Следует отметить, что при измерении потока воздуха на экспериментальном стенде число сигналов, несущих информацию о направлении скорости потока составляло порядка

15 ÷ 20 %. Как показали эксперименты с вращающимся диском, глубина обратной связи существенно зависит от мощности сигнала рассеянного в обратном направлении. Очевидно, что при измерении в воздушном потоке рассеянная обратно мощность зависит от размеров частицы и места ее пролета через пучок и поэтому не всегда глубина обратной связи достаточна. Тем не менее, результаты обработки сигналов, несущих информацию о направлении движения воздуха, в случае потока постоянного направления дают возможность определить знак скорости потока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лазерно-диодный ЛДА с внутрिलाзерным приемом и автогетеродинаризмом сигнала обладая рядом недостатков, имеет достоинствами малые габариты, низкое напряжение питания при достаточно большой мощности, высокую чувствительность и чрезвычайную простоту реализации измерительной системы. Малые габариты оптического осветительно-приемного модуля, позволяют при измерениях в крупномасштабных потоках использовать его в зондовом режиме работы. Кроме того, становится возможной организация охлаждения зонда и его использование в высокотемпературных потоках. В некоторых случаях это может оказаться единственно возможным способом измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безлепкин В.В., Затевахин М.А., Семашко С.Е. и др. Применение многоточечной системы ЛДА при экспериментальном исследовании системы отвода тепла из контейнента // Настоящий сборник.
2. Drian R.J. Particle-imaging Techniques for Experimental Fluid mechanics. – Annu. Rev. Fluid Mechanics, V. 23, 1991. – P. 261–304
3. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 303 с.
4. Shinohara S., Mochizuki A., Yoshida H., and Sumi M. Laser Doppler velocimeter using the self-mixing effect of a semiconductor laser diode, Appl. Opt., vol. 25, no. 9. P. 1417–1419, 1986
5. Соболев В.С., Кашеева Г.А. Методы активной интерферометрии с частотной модуляцией. Измерительная техника, 2010, № 3, С. 59–64.

N.V. Semidetnov, S.F. Juras

State Marine Technology University, Russia  
190008, Saint-Petersburg, ul. Lotsmanskaja, 3,  
E-mail: [n.semidetnov@mail.ru](mailto:n.semidetnov@mail.ru) [sfjuras@mail.ru](mailto:sfjuras@mail.ru)

## FLOW VELOCITY MEASUREMENT IN BACKSCATTER WITH LASER DIODE BASED LDA AND SELF MIXING RECEIVING TECHNIQUE

*Selfmixing technique has many disadvantages when compared to the standard gas laser based LDA. Nevertheless, there are some peculiarities of the method which became very profitable when some specific measurement conditions are considered. Such situation arises when the measurement is to be carried out in hot air flow inside of large compartment. The background, construction and technical characteristics of two dimensional probe based on the laser diode module are presented in the paper. The developed water-cooled sensor is used to build up the multipoint velocity measurement system, which is used to study the high temperature air flow inside the large scaled model of the nuclear power plant containment. The data are needed to verify the results of the flow field computational simulations.*

GAS FLOW, LDA, LASER DIODE, SELF MIXING TECHNIQUE, SIGNAL PROCESSING, MULTIPOINT VELOCITY MEASUREMENT