



УДК 621.378.325:535.8

А.С Нечаев, В.И Смирнов, К.С Хабаров

*Московский энергетический институт (технический университет), Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: omfi@mpei.ac.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА СКОРОСТИ ПОТОКА ДИФРАКЦИОННОГО ТИПА

АННОТАЦИЯ

С целью оптимизации характеристик оптоволоконного датчика дифракционного типа при измерении пульсаций скорости турбулентного потока рассмотрена задача рассеяния лазерного излучения на цилиндрической оптоволоконной консоли. Представлены данные по характеристикам рассеяния и результаты контрольных измерений параметров турбулентности в воздушном потоке.

**ОПТОВОЛОКОННЫЙ ДАТЧИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ,
ДИФРАКЦИЯ, РАССЕЙАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ

Оптоволоконный лазерный анемометр (ОВЛА) в отличие от известного оптоэлектронного аналога – лазерной анемометрии - не требует введения в поток рассеивающих неоднородностей, его регистрируемый сигнал имеет простую информационную структуру, не сопровождается фазовыми шумами. В отличие от известного электромеханического аналога – термоанемометрии – ОВЛА позволяет регистрировать проекции вектора скорости с учетом их знаков, что облегчает исследование потоках сложной конфигурации с возвратными течениями [1, 2].

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДА

Принцип работы ОВЛА дифракционного типа

Схема ОВЛА дифракционного типа показана на рис. 1. Принцип измерений основывается на регистрации смещения полосы рассеяния лазерного излучения на оптоволоконной консоли, изгибающейся под напором потока жидкости или газа. В этой схеме чувствительный элемент датчика не является элементом приемной или передающей оптических систем, он может быть изготовлен из любого материала, подходящего по своим упругим свойствам и дающего при облучении лазерным пучком четкую дифракционную картину. Регистрация смещения полосы рассеяния и картины дифракции производится фотоэлектрическим или фотографическим методом.

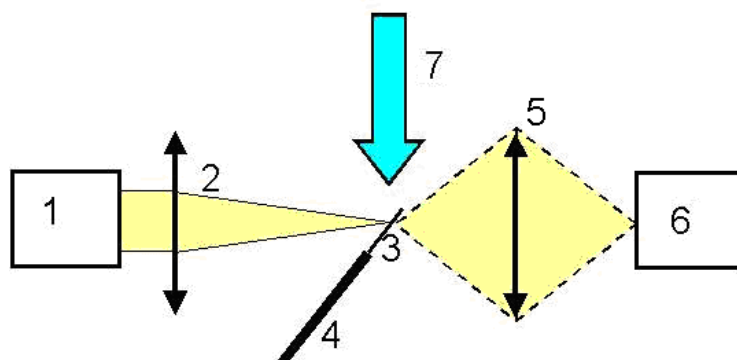


Рис. 1. Схема ОВЛА дифракционного типа: 1 – лазер, 2 – система формирования зондирующего излучения, 3 – чувствительный элемент датчика, 4 – оправа, 5 – проекционное оптическое устройство, 6 – система регистрации дифракционной картины, 7 – исследуемый поток

Характеристики рассеяния датчика при изгибе

Пример наблюдаемой на круговом экране полосы рассеяния при дифракции лазерного пучка на оптоволоконной цилиндрической консоли диаметром $d < D$ (D – диаметр лазерного пучка) показан на рис. 2.

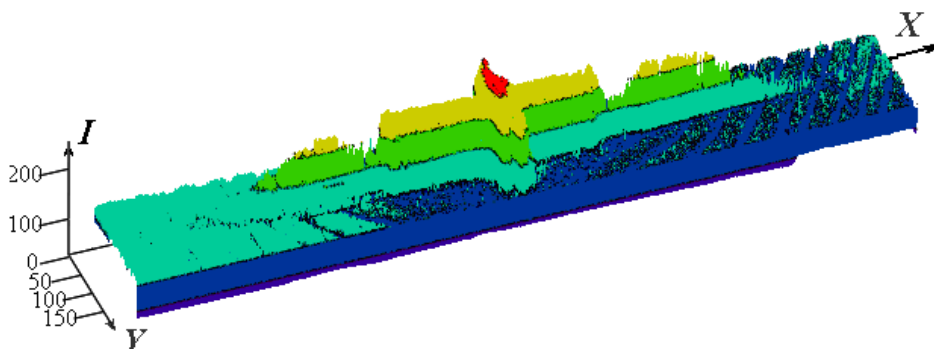


Рис. 2. Фрагмент распределение интенсивности $I(x,y)$ в полосе рассеяния на круговом экране

Волокно ориентировано вертикально, излучение при нулевом изгибе падает перпендикулярно оси волокна. Ширина полосы определяется естественной расходимостью лазерного пучка. Развертка (рассеяние) в горизонтальной плоскости определяется совокупностью оптических эффектов, связанных с дифракцией, преломлением, отражением и оптической силой сформированной волокном эквивалентной цилиндрической линзы.

При изгибе ось наклоняется и искривляется, что приводит к смещению и деформации полосы рассеяния. На практике при использовании ОВЛА кривизна незначительна и положительный эффект, используемый для измерения скорости потока, определяется наклоном оси волокна в точке пересечения с лазерным пучком.

Характер смещения полосы рассеяния на панорамном экране существенно зависит от направления вектора скорости потока u относительно волнового вектора k падающего на волокно излучения. Соответствующие графики показаны на рис. 3.

Из графика рис. 1, а видно, при наклоне оптоволоконна вдоль лазерного пучка полоса рассеяния смещается в основном в направлении назад в диапазоне углов рассеяния от 60° до 300° . В направлении вперед в диапазоне углов рассеяния от -30° до 30° смещение полосы рассеяния мало и, если позиционно чувствительный фотоприемник расположен под этими углами, он не будет реагировать на наклон оптоволоконна в направлении лазерного пучка.

Напротив, как видно из рис.1, б, при скорости потока перпендикулярно лучу эффект изгиба сводится к повороту плоскости рассеяния вокруг луча. Позиционно чувствительный

фотоприемник, установленный, например, под углом рассеяния в диапазоне от 5° до 30° будет реагировать на проекцию скорости потока перпендикулярную лучу.

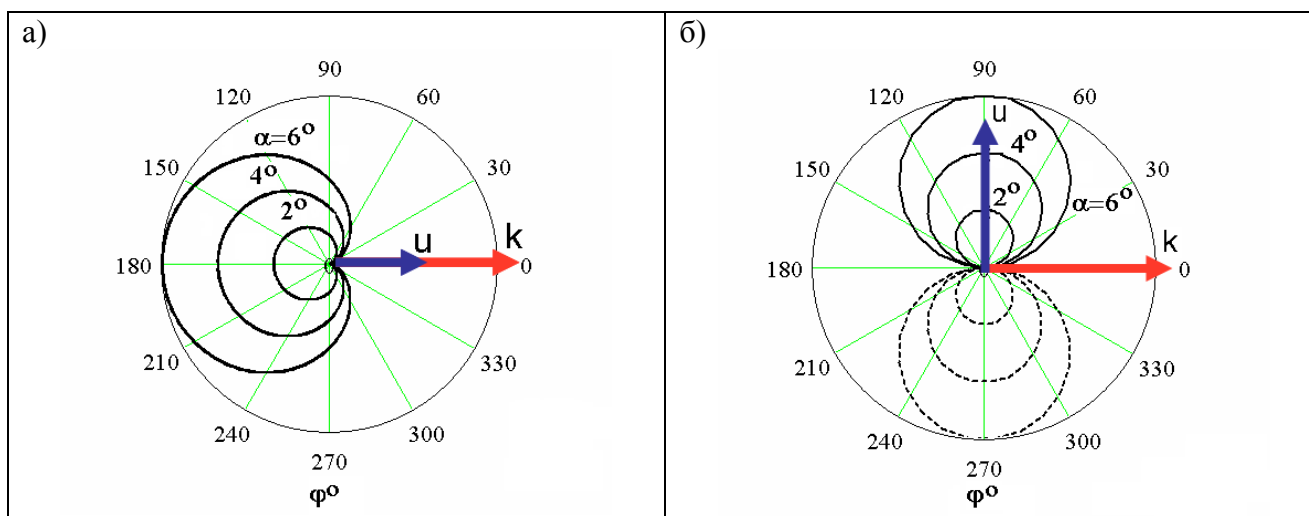


Рис. 3. Смещение полосы рассеяния вдоль вертикальной оси X в полярных координатах для различных углов наклона α в зависимости от угла рассеяния φ : а) вектор скорости потока и волновой вектор лазерного пучка параллельны; б) вектор скорости потока и волновой вектор лазерного пучка перпендикулярны

Таким образом, как и для лазерной анемометрии, для ОВЛА дифракционного типа при определенных выше условиях можно ввести понятие вектора чувствительности \vec{K} , направленного перпендикулярно лучу лазера. Измеряемой величиной здесь является смещение полосы рассеяния Δx , которое определяется скалярным произведением вектора скорости \vec{u} и вектора чувствительности \vec{K}

$$\Delta x = \beta(\vec{K}, \vec{u}), \quad (1)$$

где β определяется тарировкой и зависит от геометрии и оптико-механических свойств датчика. В отличие от лазерной анемометрии вектор \vec{K} в (1) можно определить как единичный и безразмерный.

Пример реализации ОВЛА дифракционного типа в двухканальном варианте

Контрольные измерения проводились на макете воздушной струи при умеренных числах Рейнольдса. Параметры потока и геометрия сопла струи приведены в [1]. Использовалась фотоэлектрическая схема регистрации смещения полосы рассеяния.

На рис. 5 показана схема установки для измерений в турбулентном потоке в двухканальном режиме. Луч полупроводникового лазера (2), питающегося от стандартного лабораторного блока питания (1) попадает на светоделительную призму (3), один из пучков попадает на оптоволоконный стержень (5) сразу после выхода из призмы, другой после отражения от зеркала (4). Воздушный поток заставляет стержень совершать колебания, при этом происходит поворот плоскостей рассеяния, и сигналы на ФЭУ изменяется. Сигналы с ФЭУ усиливаются, оцифровываются и обрабатываются на ПК (7).

В выполненных контрольных измерениях углы рассеяния были равны $\varphi_1 = \varphi_2 = 12^\circ$. Направление вектора чувствительности первого канала составляло угол 45° с направлением среднего сечения, второго канала – 135° .

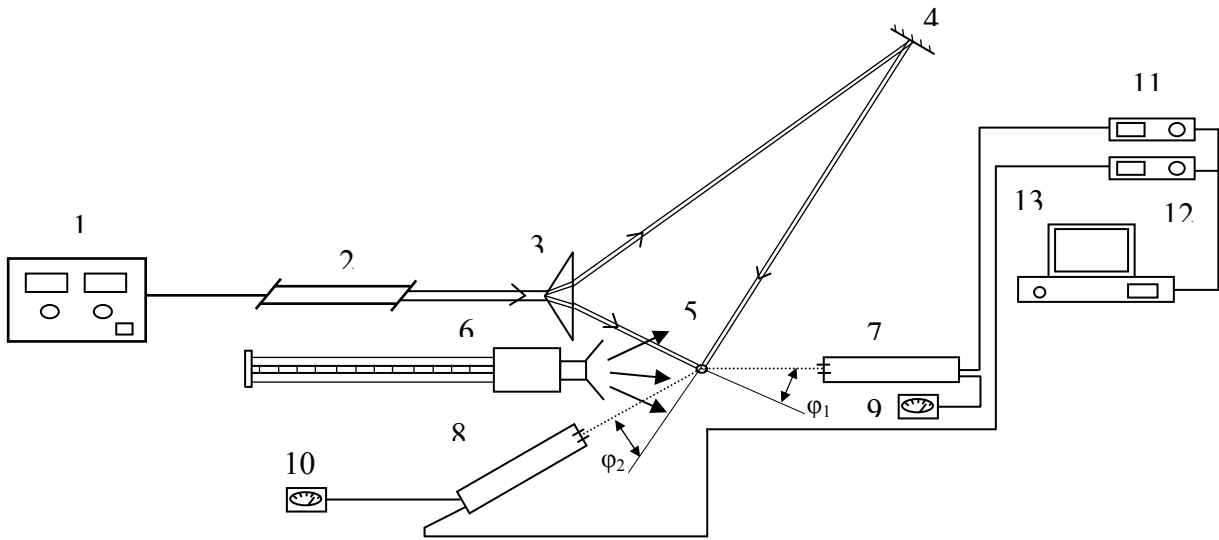


Рис. 4. Схема измерений в двухканальном режиме. 1 – Блок питания, 2 – п/п лазер, 3 – светоделительная призма, 4 – зеркало 5 – оптоволоконный датчик, 6 – устройство формирования воздушного потока, 7,8 – ФЭУ с щелевыми диафрагмами, 9,10 – микроамперметры, 11,12 – усилители, 13 – компьютер с аналогово-цифровой платой

При выбранной геометрии измерялись компоненты турбулентных пульсаций скорости в в плоскости рисунка в направлении $\pm 45^\circ$ к оси струи. Пульсации аналоговых сигналов в первом и втором канале определяются выражениями

$$i_1(t) = \beta \frac{\sqrt{2}}{2} [u_x(t) + u_y(t)], \quad (2)$$

$$i_2(t) = \beta \frac{\sqrt{2}}{2} [-u_x(t) + u_y(t)], \quad (3)$$

где $u_x(t)$ – пульсационная продольная скорость, $u_y(t)$ – пульсационная поперечная скорость потока в точке измерения.

После оцифровки в соответствии с (1) – (3) рассчитывались средние значения квадратов сигналов, и определялась интенсивность σ^2 двумерного вектора пульсаций скорости, а также нормированный на σ^2 коэффициент корреляции R_{xy} продольных и поперечных пульсаций по следующим формулам:

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2, \quad (4)$$

$$R_{xy} = \frac{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (5)$$

где

$$\sigma_1 = \langle [i_1(t)]^2 \rangle = \beta^2 \frac{1}{2} \left[\langle [u_x(t)]^2 \rangle + 2 \langle u_x(t)u_y(t) \rangle + \langle [u_y(t)]^2 \rangle \right],$$

$$\sigma_2 = \langle [i_2(t)]^2 \rangle = \beta^2 \frac{1}{2} \left[\langle [u_x(t)]^2 \rangle - 2 \langle u_x(t)u_y(t) \rangle + \langle [u_y(t)]^2 \rangle \right].$$

Некоторые результаты измерений показаны на рис. 5.

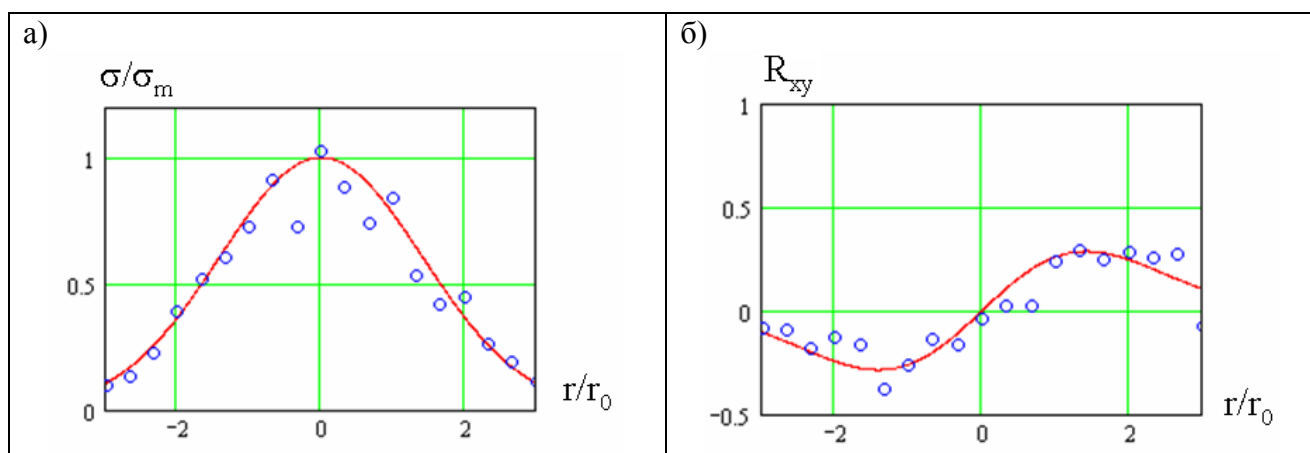


Рис. 5. Результаты контрольных измерений в поперечном сечении воздушной струи: а) профиль относительной интенсивности турбулентных пульсаций скорости (4); б) профиль коэффициента корреляции (5)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования характеристик рассеяния лазерного излучения на оптоволоконном стержне позволяют определить оптимальные параметры схем ОЛВА дифракционного типа для регистрации двух ортогональных проекций мгновенных пульсаций скорости турбулентного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюкова О.В., Смирнов В.И. Измерения статистических характеристик турбулентности оптической системой с гибридным оптоволоконным датчиком. Измерительная техника. 2006. №9. С. 25-29.

2. Smirnov V.I., Birukova O.V., Pechenuk V.A. "Measurements of turbulence by laser system with hybrid fiber-optic sensor" in Eight International Conference on Optical Methods of Flow Investigation, Yuri N. Dubnistchev, Bronius S. Rinkevichius, Editors, Proceedings of SPIE, Vol. 6262, p.157-167 (2006).

A.S. Netchaev, V.I. Smirnov, K.S. Chabarov
 Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,
 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: omfi@mpei.ac.ru

LASER FIBER OPTIC DIFFRACTIONAL SENSOR AND ITS APPLICATION FOR FLOW MEASUREMENTS

With the purpose of performance optimization of a fiber-optical diffraction type sensor used for measuring turbulent pulsations in flows the problem of laser radiation scattering on the optical fiber is considered. Data on performances of scattering and results of test measuring of turbulence in airflow are presented.

FIBRE-OPTICAL SENSOR, LASER RADIATION, DIFFRACTION, SCATTERING, TURBULENCE