



УДК 621.378.325:535.8

И.А. Лапицкая, К.М. Лапицкий, Г.М. Янина

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: i.a.bamburkina@mail.ru*

ЛАЗЕРНАЯ ОПТОВОЛОКОННАЯ СИСТЕМА С ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ СИГНАЛА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

АННОТАЦИЯ

Выполнены экспериментальные исследования характеристик волоконно-оптического датчика, работающего по схеме светового маркера с модуляцией лазерного излучения при регистрации сигнала цифровой фотокамерой.

В процессе работы создан лабораторный макет лазерной системы диагностики статистических характеристик турбулентности на основе фотографической регистрации аккумулярованных двумерных сигналов оптоволоконного датчика.

Разработана фотографическая методика регистрации прогиба рабочего элемента оптоволоконной системы. Проведена экспериментальная проверка результатов расчета резонансных частот датчика.

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ОПТОВОЛОКОННЫЙ ДАТЧИК, ПОТОКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА, СТАТИСТИКА ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

ВВЕДЕНИЕ

Исследование турбулентных течений по-прежнему остается одной из центральных тем в аэродинамике, метеорологии и химической технологии. Столь постоянный интерес определяется тем, что турбулентные течения являются самой распространенной формой движения жидкостей и газов.

Несмотря на большое число научных публикаций по теории турбулентности [1–4], это явление по-прежнему остается до конца не изученным, так как полное представление о турбулентном движении не дают ни математическое, ни экспериментальное описание.

Для экспериментального исследования потоков разработано и используется большое количество методов, приборов и аппаратуры; поэтому среди них в настоящее время имеется широкий выбор, причем для измерений какого-либо специального типа одни подходят больше, чем другие. Большинство из этих методов и приборов предназначено для измерения скорости в потоках, которые либо являются, либо считаются не турбулентными; фактически лишь некоторые из них пригодны для измерений в турбулентных потоках или, в более узком смысле, для измерения самой турбулентности.

Основные затруднения при измерении турбулентности вызваны тем, что турбулентность представляет собой хаотичный, пульсирующий поток и носит трехмерный характер [5-6]. Более того, высокая частота пульсации, представляющих для нас интерес в турбулентных потоках, создает большие трудности при выборе измерительного прибора.

Широкое применение для исследования полей скорости и турбулентности потоков жидкости и газа находят оптоэлектронные измерители, что важно для изучения ключевых физических явлений в гидродинамике, теплофизике, энергетике, метеорологии, химической технологии и ряде других областей. Спектр гибридных оптоэлектронных измерителей очень широк. К гибридным оптоэлектронным измерителям можно отнести лазерные доплеровские анемометры, анемометры изображений частиц, системы лазерной индуцированной флуоресценции, лазерного светорассеяния и люминесценции, лазерной дифракционной и рефракционной диагностики, лазерной интерферометрии, голографической интерферометрии, лазерной визуализации и ряд других. Особенность подобных систем состоит в сочетании новейших достижений оптики, электроники, вычислительной техники и использовании совершенных радиотехнических методов приема и обработки сложных статистических сигналов при наличии внешних помех и внутренних шумов излучателя и фотоэлектрического преобразователя.

В системе в качестве чувствительного элемента (датчика турбулентности) используется оптическое волокно. Характеристики турбулентности определяются по отклонению волокна под действием воздушного потока. Для определения величины отклонения используется схема “светового маркера”. Принцип ее действия заключается в том, что излучение от лазера вводится в волокно и проецирующей оптической системой фокусируется на экран в виде пятна. Это пятно под действием воздушного потока начинает смещаться, описывая на экране траекторию, повторяющую турбулентные пульсации. В качестве регистрирующего элемента использована цифровая фотокамера.

Разработанный метод позволяет визуализировать действие потока на чувствительный элемент. Система позволяет визуально оценить как изменение скорости, так и пульсации потока. Также следует отметить простоту юстировки системы, не нужен точный расчет ввода излучения в волоконный световод.

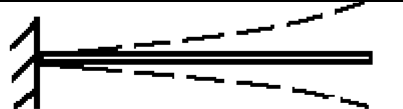
Кроме того, оптоволоконная система обладает высокой мобильностью и может использоваться без применения дорогостоящего и громоздкого вычислительно-исследовательского оборудования, что, безусловно, гарантирует широкие возможности для практического применения подобного устройства. Достоинством системы является и то, что ее выходной сигнал, в отличие от лазерного доплеровского анемометра, непрерывен.

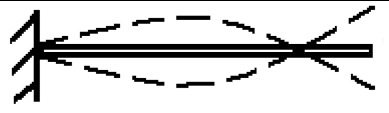

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Главным элементом конструкции лазерной оптоволоконной системы является волоконно-оптический датчик турбулентности. Оптоволоконный датчик турбулентности представляет собой отрезок оптического волокна, один из концов которого закреплен в неподвижной стальной оправе таким образом, что имеет возможность свободно колебаться в воздушном турбулентном потоке. Этот чувствительный элемент является консолью, закрепленной с одной стороны и свободной с другой.

Представляют интерес собственные частоты колебаний стержня-датчика и возможность их регулировки изменением геометрических и физических параметров датчика. Рассмотрим решение задачи о колебаниях консольного стержня длиной L , поперечного сечения диаметра d , под действием гармонической нагрузки, распределенной по длине стержня. При совпадении частоты внешнего воздействия с одной из собственных частот колебаний консольного стержня $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ возникают резонансные колебания (таблица 1).

Таблица 1. Собственные частоты колебаний консольного стержня [7–8]

$\omega_1 = 0,879 \cdot \frac{d}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$		Первая форма колебаний
--	---	------------------------

$\omega_2 = 5,51 \cdot \frac{d}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$		Вторая форма колебаний
$\omega_3 = 13,52 \cdot \frac{d}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$		Третья форма колебаний

В работе было использовано волокно, изготовленное из стекловолокна с модулем Юнга $E = 0,6 \cdot 10^{11}$ Па, плотностью материала $\rho = 2,2 \cdot 10^3$ кг/м³, диаметром $d = 230$ мкм различной длины.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЛАЗЕРНОЙ ОПТОВОЛОКОННОЙ СИСТЕМЫ

Схема экспериментальной установки и ее принцип действия

Турбулентное движение жидкостей или газов в большой степени хаотично, неупорядочено настолько, что все его характеристики изменяются случайно в пространстве и во времени.

Однако указанная хаотичность, неупорядоченность носит относительный характер. В недрах этой неупорядоченности скрыты определенные закономерности, проявляющиеся при усреднении каких-либо характеристик потока, и эти среднестатистические величины оказываются воспроизводимыми, они подчиняются объективным законам турбулентного движения.

В данной работе исследование характеристик потока проводилось по схеме, представленной на рисунке 1.

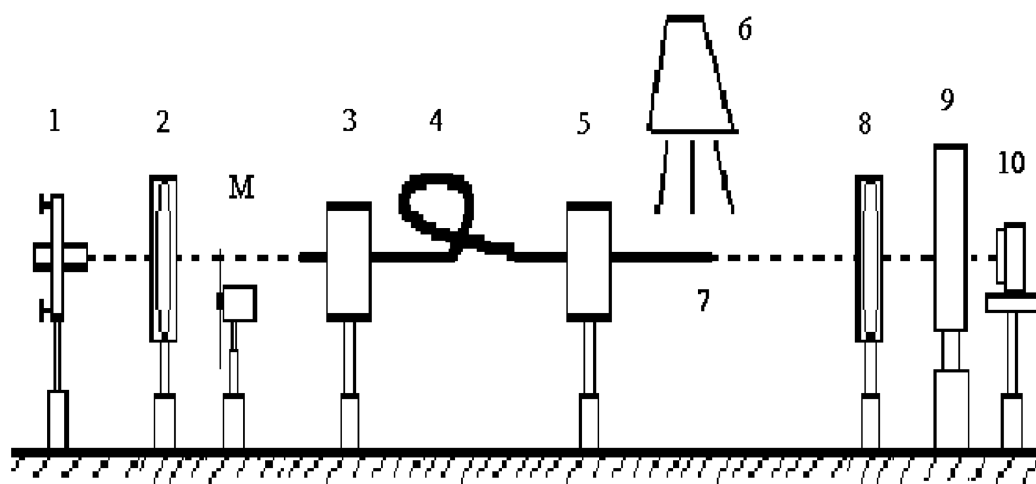


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На рис. 1 введены следующие обозначения функциональных элементов: 1 – He-Ne лазер; 2 – фокусирующая оптическая система; 3 – устройство ввода излучения; 4 – оптическое волокно; 5 – оправа чувствительного элемента; 6 – устройство формирования воздушного потока; 7 – чувствительный элемент (оптическое волокно); 8 – проецирующая оптическая система; 9 – экран (матовое полупрозрачное стекло); 10 – цифровой фотоаппарат; М – механический модулятор.

Принцип действия экспериментальной установки таков: лазерный луч при помощи оптической системы 2 фокусируется на жестко закрепленный в унифицированном юстировочном модуле торец световода (устройство ввода излучения 3). Другой конец

световода 4 закреплен в оправе 5 таким образом, что имеет возможность свободно изгибаться под воздействием турбулентного течения, создаваемого устройством формирования воздушного потока 6. Таким образом, этот изгибающийся участок световода является чувствительным элементом 7 экспериментальной установки. Необходимо отметить, что, изменяя длину подвижного участка световода можно варьировать чувствительность датчика турбулентности в широких пределах. Лазерное излучение, выходящее с колеблющегося под воздействием воздушного потока торца оптического волокна, фокусируется проецирующей оптической системой 8 на экран 9. Изменения, происходящие на экране, фиксируются цифровым фотоаппаратом 10.

Представленная выше схема позволяет визуализировать действие потока на чувствительный элемент. Схема позволяет визуально оценить как изменение скорости, так и пульсации потока.

В качестве регистрирующего прибора могут быть использованы различные фотоприемники, у которых информация о потоке находится в выходном электрическом сигнале, но при их использовании теряются сведения о направлении потока. Фотографический же способ регистрации хорош тем, что полезная информация содержится в получаемых изображениях. При этом записанный сигнал непрерывен, а все изображение представлено в виде матрицы чисел, удобной для последующей записи и обработки в компьютере.

В схеме используется механический модулятор с 72 прямоугольными отверстиями в растре. С помощью него можно получить зависимости координат светового пятна от времени.

Обработка и анализ результатов измерения

Главным достоинством применения модулятора, является то, что, разбив траекторию движения светового пятна на зависимости $X(t)$ и $Y(t)$, можно получить информацию о частоте исследуемого физического процесса.

Обычно для нахождения спектра процесса используют специальный прибор – анализатор. Спектр является совокупностью гармоник различной частоты и амплитуды. Следовательно, анализатор представляет собой прибор, позволяющий измерять амплитуду и частоту гармонических составляющих физического процесса.

Как правило, спектр турбулентных потоков содержит большое количество частот. Поэтому в основе действия многих спектральных приборов, используемых для анализа турбулентных пульсаций, лежит явление резонанса. Анализ резонансных частот с помощью одного и того же прибора можно осуществить, применяя чувствительный прибор с переменной настройкой.

Для получения частотного спектра используется преобразование Фурье:

$$P(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} P(t) e^{-i\omega t} dt .$$

На рис. 2, 4 приведены траектории движения светового пятна по осям x и y для двух различных значений времени экспозиции, а на рисунках 3, 5 вычисленная с помощью преобразования Фурье, резонансная частота для длины чувствительного элемента $L = 3$ см.

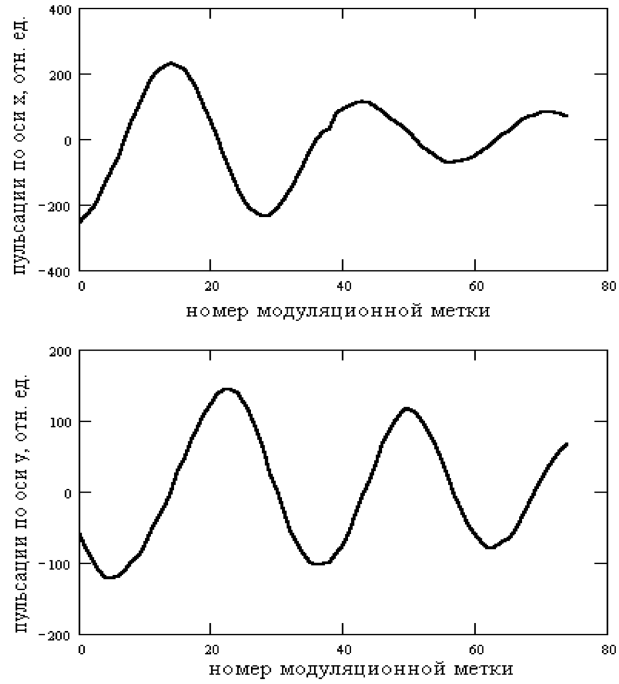
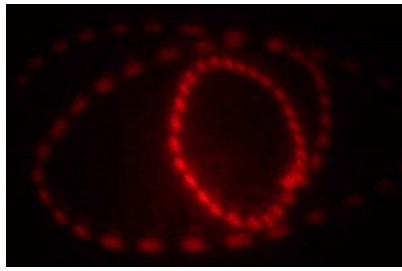


Рис. 2. Изображение, полученное при модуляции лазерного излучения, для $L = 3$ см и траектории движения светового пятна по осям x и y (время экспозиции $1/30$ с)

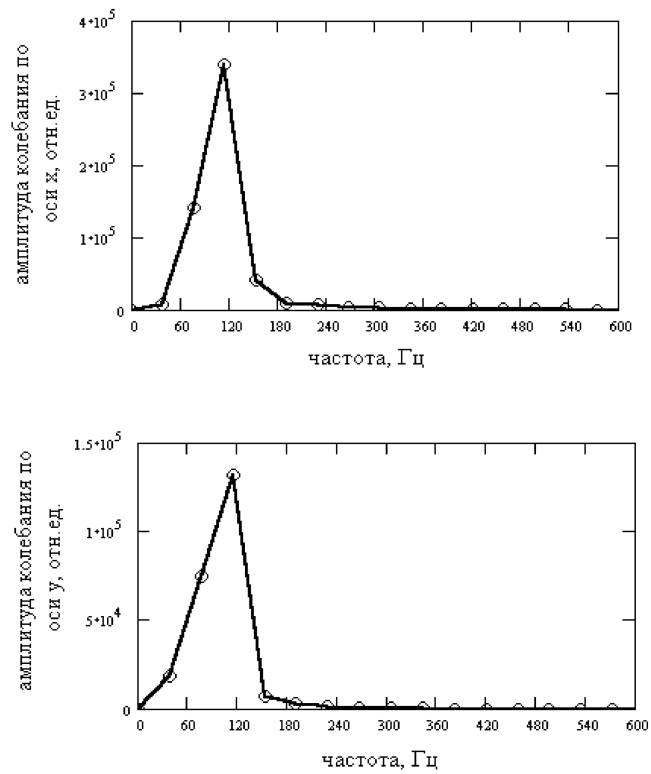


Рис. 3 – Резонансная частота для $L = 3$ см

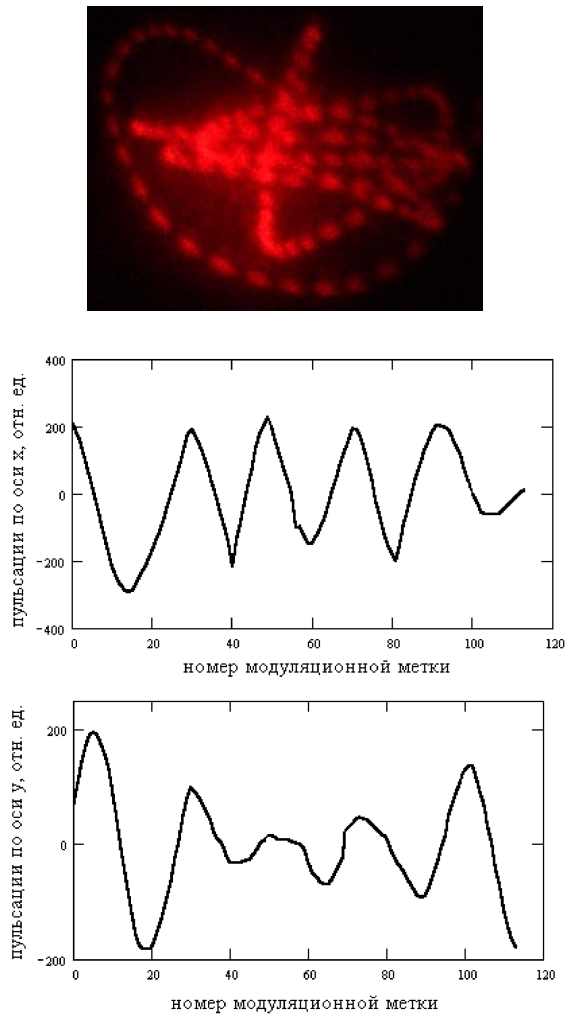


Рис. 4. Изображение, полученное при модуляции лазерного излучения, для $L = 3$ см и траектории движения светового пятна по осям x и y (время экспозиции 1/15 с)

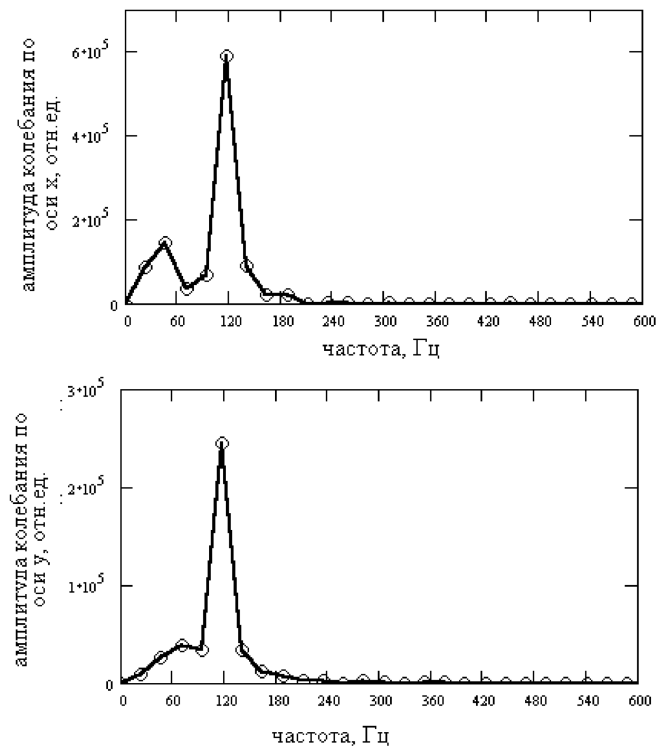


Рис. 5. Резонансная частота для $L = 3$ см

Теоретическая частота, рассчитанная по формуле из таблицы 1 для длины датчика $L = 3$ см равна 114 Гц. Экспериментально полученная частота при времени экспозиции $1/15$ с равна 117 Гц. Эта частота соответствует частоте, приведенной на рисунке 3 для $L = 3$ см и времени экспозиции $1/30$ с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана фотографическая методика регистрации прогиба рабочего элемента оптоволоконной системы. Проведена экспериментальная проверка результатов расчета резонансных частот датчика.

Разработанный метод позволяет визуализировать действие потока на чувствительный элемент. Система позволяет визуально оценить как изменение скорости, так и пульсации потока. Также следует отметить простоту юстировки системы, не нужен точный расчет ввода излучения в волоконный световод.

Кроме того, оптоволоконная система обладает высокой мобильностью и может использоваться без применения дорогостоящего и громоздкого вычислительно-исследовательского оборудования, что, безусловно, гарантирует широкие возможности для практического применения подобного устройства.

Данная система имеет перспективы развития в направлении для двухкомпонентных измерений, измерения корреляций ортогональных компонент (напряжений Рейнольдса). Может применяться в качестве анализатора спектра турбулентных пульсаций определенного масштаба, которые в резонансе с собственными частотами колебания датчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смирнов В.И., Устименко В.В., Янина Г.М.** Лазерный оптико-механический датчик турбулентности. // Оптические методы исследования потоков: Тез. докл. IV Научно-техн. конф. М.: МЭИ, 1997. С. 148.
2. **Баканова Е.В., Савич П.А., Устименко В.В., Янина Г.М.** Оптоволоконный датчик турбулентности: варианты измерительных схем, характеристики, тестирование: Труды VI Международной научно-технической конференции. Оптические методы исследования потоков. М.: МЭИ, 2001. С. 26-29.
3. **Численное** и экспериментальное исследование полей скорости и температуры азимутально закрученного электровихревого течения / В.Г. Жилин, Ю.П. Ивочкин, А.А. Оксман, И.О. Тепляков // Сборник тезисов докладов 4-й международной конференции «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках». М.: Издательский дом МЭИ. 2011. С. 31 – 32.
4. **Исследование**, с применением волоконно-оптических датчиков скорости, жидкометаллических течений, инициированных электрическим током / В.Г. Жилин, Ю.П. Ивочкин, А.А. Оксман, И.О. Тепляков // В сборнике докладов межведомственного семинара «Тепломассоперенос и свойства жидких металлов». – Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 2008. С. 219 – 226.
5. **Турбулентность.** Принципы и применения. / Под ред. У. Фроста, Т. Моудлена: Пер. с англ. / Под ред. В.В.Струминского. М.: Мир. 1980. 527 с.
6. **Брэдшоу П.** Введение в турбулентность и ее измерение: Пер. с англ./Под ред. Г.С. Глушко. М.: Мир. 1974. 287 с.
7. **Бирюкова О.В., Смирнов В.И., Хроматов В.Е., Баженова Д.В., Бухарин Е.С.** Исследование резонансных характеристик гибридного оптоволоконного механического датчика турбулентности. Труды VII Международной научно-техн. конф. Оптические методы исследования потоков. М.:МЭИ.2003. С. 434-437.
8. **Вибрации в технике:** справочник в 6 томах. Том 1. колебания линейных систем. Под ред. Болотина В.В. М.: Машиностроение, 1999.

I.A. Lapitskaya, K.M. Lapitskiy, G.M. Yanina

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14, E-mail: i.a.bamburkina@mail.ru*

LASER FIBRE-OPTICAL SYSTEM WITH DIGITAL REGISTRATION OF A SIGNAL FOR AIR STREAM TURBULENT PULSATIONS MEASUREMENT

Experimental researches of optical fibre sensor characteristics working by scheme of a light marker with laser radiation modulation with digital camera signal registration are executed.

During the work the laboratory model of laser system diagnostics turbulence statistical characteristics is created on the basis of photographic registration of the accumulated bidimensional signals of the fibre-optical sensor.

The photographic technique registration of a deflection of a working element of fibre-optical system is developed. Experimental check of results of calculation of resonant frequencies of the sensor is carried out.

**TURBULENCE, TURBULENCE DIAGNOSTICS, FIBRE-OPTICAL SENSOR, LIQUID
AND GAS FLOWS, STATISTICS OF TURBULENT PULSATIONS**