

УДК 621.378.325:535.8

Ю.В. Керв., И.А. Кондаков, В.И. Смирнов

НИУ МЭИ, Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: omfi@mpei.ac.ru

ЛАЗЕРНЫЕ ОПТОВОЛОКОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ 3-го и 4- го ПОРЯДКА

АННОТАЦИЯ

Разработана методика расчета двумерных статистических характеристик турбулентности 3-го и 4-го порядка по сигналам оптоволоконного датчика скорости проекционного типа. Представлены профили характеристик турбулентности в осесимметричной затопленной струе воды при числе Рейнольдса $1,5 \cdot 10^4$. Метод позволяет выявить области потока, в которых статистика пульсаций скорости отклоняется от нормального гауссова закона.

**ОПТОВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ АНЕМОМЕТР, ТУРБУЛЕНТНАЯ СТРУЯ, 2-D
ИЗМЕРЕНИЯ, СТАТИСТИКА ПУЛЬСАЦИЙ**

ВВЕДЕНИЕ

Выполненные в [1, 2] исследования показывают, что аккумулярованный сигнал оптоволоконного лазерного анемометра (ОВЛА) проекционного типа в потоках жидкости дает оценку двумерной плотности вероятности пульсаций локальной скорости в виде матрицы относительных вероятностей проекций скорости. Это позволяет по стандартным алгоритмам рассчитывать моменты данных распределений, являющиеся важными характеристиками турбулентности. Тестовые измерения в турбулентной затопленной струе воды [2] подтвердили эффективность оптоволоконного метода сравнением результатов по степени турбулентности и корреляциям продольных и поперечных пульсаций с аналогичными данными лазерной доплеровской анемометрии. В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с применением ОВЛА для измерения статистических характеристик турбулентности высших порядков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДА

Принцип работы ОВЛА проекционного типа

Схема ОВЛА проекционного типа показана на рис. 1. Принцип измерений основывается на фотографировании с большим временем экспозиции изображения светящегося торца оптоволоконного датчика, внесенного в исследуемую область турбулентного течения.

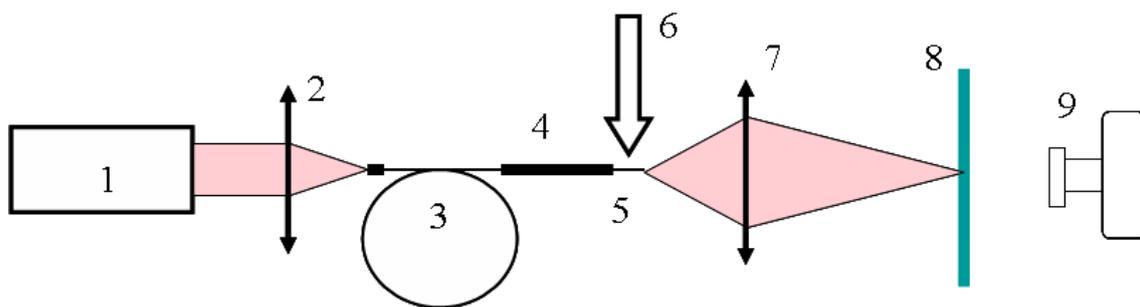


Рис. 1. Схема ОБЛА проекционного типа: 1 – полупроводниковый лазер; 2 – фокусирующая оптическая система; 3 – оптическое волокно; 4 – оправка чувствительного элемента; 5 – датчик (чувствительный элемент оптического волокна); 6 – исследуемый поток; 7 – проекционный объектив; 8 – экран; 9 – цифровая фотокамера с интерференционным фильтром

Фотографирование осуществлялось с большим по сравнению с временным масштабом турбулентности временем усреднения. Результирующая картина представляет собой смазанное изображение излучающего торца в виде пятна с распределением яркости, соответствующим относительному времени пребывания торца в данной области. После исключения аппаратных искажения, связанных с конечными размерами торца, это позволяет оценить двумерную плотность вероятности смещения.

Методика и алгоритмы обработки данных

Средствами программирования Mathcad фотоснимки представлялись в виде матрицы значений относительной вероятности смещений торца датчика. По стандартным алгоритмам рассчитывались следующие статистические параметры.

Моменты 1-го и 2-го порядков и коэффициент корреляции R_{xy} :

$$\begin{aligned} \alpha_x &= \bar{x}, & \alpha_y &= \bar{y}, \\ \mu_{xx} &= \langle (x - \bar{x})^2 \rangle, & \mu_{yy} &= \langle (y - \bar{y})^2 \rangle, \\ \mu_{xy} &= \langle (x - \bar{x})(y - \bar{y}) \rangle, \\ R_{xy} &= \frac{\mu_{xy}}{\sqrt{\mu_{xx}\mu_{yy}}}. \end{aligned}$$

Моменты 3-го порядка и связанные с ними безразмерные коэффициенты формы (коэффициенты асимметрии):

$$\begin{aligned} \mu_{xxx} &= \langle (x - \bar{x})^3 \rangle, & \mu_{yyy} &= \langle (y - \bar{y})^3 \rangle, \\ \mu_{xxy} &= \langle (x - \bar{x})^2(y - \bar{y}) \rangle, & \mu_{xyy} &= \langle (x - \bar{x})(y - \bar{y})^2 \rangle, \\ \gamma_{xxx} &= \frac{\mu_{xxx}}{\sqrt{\mu_{xx}^3}}, & \gamma_{yyy} &= \frac{\mu_{yyy}}{\sqrt{\mu_{yy}^3}}, & \gamma_{xxy} &= \frac{\mu_{xxy}}{\sqrt{\mu_{xx}^2\mu_{yy}}}, & \gamma_{xyy} &= \frac{\mu_{xyy}}{\sqrt{\mu_{xx}\mu_{yy}^2}}. \end{aligned}$$

Моменты 4-го порядка и связанные с ними безразмерные коэффициенты формы (коэффициенты эксцесса):

$$\begin{aligned}
\mu_{xxxx} &= \langle (x - \bar{x})^4 \rangle, & \mu_{yyyy} &= \langle (y - \bar{y})^4 \rangle, & \mu_{xxxxy} &= \langle (x - \bar{x})^3 (y - \bar{y}) \rangle, \\
\mu_{xyyy} &= \langle (x - \bar{x})(y - \bar{y})^3 \rangle, & \mu_{xxyy} &= \langle (x - \bar{x})^2 (y - \bar{y})^2 \rangle, \\
\gamma_{xxxx} &= \frac{\mu_{xxxx}}{\mu_{xx}^2} - 3, & \gamma_{yyyy} &= \frac{\mu_{yyyy}}{\mu_{yy}^2} - 3, \\
\gamma_{xxxxy} &= \frac{\mu_{xxxxy}}{\sqrt{\mu_{xx}^3 \mu_{yy}}} - 3R_{xy}, & \gamma_{xyyy} &= \frac{\mu_{xyyy}}{\sqrt{\mu_{xx} \mu_{yy}^3}} - 3R_{xy}, \\
\gamma_{xxyy} &= \frac{\mu_{xxyy}}{\mu_{xx} \mu_{yy}} - (1 + 2R_{xy}^2).
\end{aligned}$$

Все коэффициенты формы определены таким образом, что для нормального распределения они обнуляются.

Учет смещений оценок вследствие конечных размеров датчика для симметричной аппаратной функции выполнялся по формулам:

$$\begin{aligned}
\mu_{xx}^T &= \mu_{xx}^M - \mu_{xx}^A, & R_{xy}^T &= R_{xy}^M \sqrt{\frac{\mu_{xx}^M \mu_{yy}^M}{(\mu_{xx}^M - \mu_{xx}^A)(\mu_{yy}^M - \mu_{yy}^A)}}, \\
\gamma_{xxx}^T &= \gamma_{xxx}^M \left(\frac{\mu_{xx}^M}{\mu_{xx}^M - \mu_{xx}^A} \right)^{3/2}, & \gamma_{yyy}^T &= \gamma_{yyy}^M \left(\frac{\mu_{yy}^M}{\mu_{yy}^M - \mu_{yy}^A} \right)^{3/2}, \\
\gamma_{xxy}^T &= \gamma_{xxy}^M \sqrt{\frac{(\mu_{xx}^M)^2 (\mu_{yy}^M)}{(\mu_{xx}^M - \mu_{xx}^A)^2 (\mu_{yy}^M - \mu_{yy}^A)}}, & \gamma_{xyy}^T &= \gamma_{xyy}^M \sqrt{\frac{(\mu_{xx}^M)(\mu_{yy}^M)^2}{(\mu_{xx}^M - \mu_{xx}^A)(\mu_{yy}^M - \mu_{yy}^A)^2}}, \\
\gamma_{xxxx}^T &= \gamma_{xxxx}^M \left(\frac{\mu_{xx}^M}{\mu_{xx}^M - \mu_{xx}^A} \right)^2 - \gamma_{xxxx}^A \left(\frac{\mu_{xxxx}^A}{\mu_{xxxx}^M - \mu_{xxxx}^A} \right)^2, \\
\gamma_{yyyy}^T &= \gamma_{yyyy}^M \left(\frac{\mu_{yy}^M}{\mu_{yy}^M - \mu_{yy}^A} \right)^2 - \gamma_{yyyy}^A \left(\frac{\mu_{yyyy}^A}{\mu_{yyyy}^M - \mu_{yyyy}^A} \right)^2, \\
\gamma_{xxyy}^T &= \gamma_{xxyy}^M \frac{\mu_{xx}^M \mu_{yy}^M}{(\mu_{xx}^M - \mu_{xx}^A)(\mu_{yy}^M - \mu_{yy}^A)} - \gamma_{xxyy}^A \frac{\mu_{xx}^A \mu_{yy}^A}{(\mu_{xx}^M - \mu_{xx}^A)(\mu_{yy}^M - \mu_{yy}^A)}, \\
\gamma_{xxxxy}^T &= \gamma_{xxxxy}^M \sqrt{\frac{(\mu_{xx}^M)^3 (\mu_{yy}^M)}{(\mu_{xx}^M - \mu_{xx}^A)^3 (\mu_{yy}^M - \mu_{yy}^A)}}.
\end{aligned}$$

$$\gamma_{xyyy}^T = \gamma_{xyyy}^M \sqrt{\frac{(\mu_{xx}^M)(\mu_{yy}^M)^3}{(\mu_{xx}^M - \mu_{xx}^A)(\mu_{yy}^M - \mu_{yy}^A)^3}}$$

В этих формулах верхний индекс M соответствует результатам измерения первичных смещенных распределений, A – параметрам аппаратной функции, T – восстановленным параметрам турбулентности.

Тестирование программ методом численного моделирования

Конечные размеры светящегося торца оптоволоконного датчика приводят к сглаживанию и размыванию истинной картины распределения вероятности его смещений. Восстановления истинной картины в общем случае требует решения интегрального уравнения Фредгольма, которое в упрощенной символической форме можно представить как

$$wM(x, y) = wT(x, y) * wA(x, y),$$

где $wM(x, y)$ – измеренное распределение; звездочка в левой части равенства обозначает интеграл-свертку искомого распределения $wT(x, y)$ и аппаратной функции $wA(x, y)$. Для восстановления истинного распределения используются алгоритмы БПФ. Пример численного моделирования задачи исключения аппаратной функции иллюстрирует рис.2.

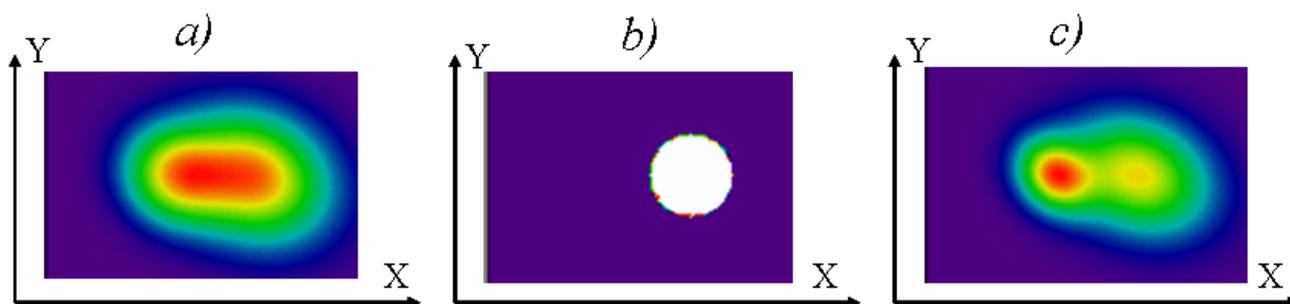


Рис. 2. Радужные картограммы моделированных сигналов ОВЛА проекционного типа: *a*) – сигнал $wM(x, y)$ до исключения аппаратной функции; *b*) – аппаратная функция $wA(x, y)$ (сигнал от неподвижного датчика) *c*) – восстановленный сигнал $wT(x, y)$

Представляющие интерес высшие моменты распределения $wT(x, y)$ при этом могут быть определены непосредственно по восстановленному сигналу и сопоставлены с результатами расчетов по формулам предыдущего раздела. Это позволило протестировать разработанные алгоритмы и программы. Использование соотношений между моментами является более предпочтительным, так как процедура восстановления при наличии в измеряемых распределениях даже незначительных шумов является неустойчивой.

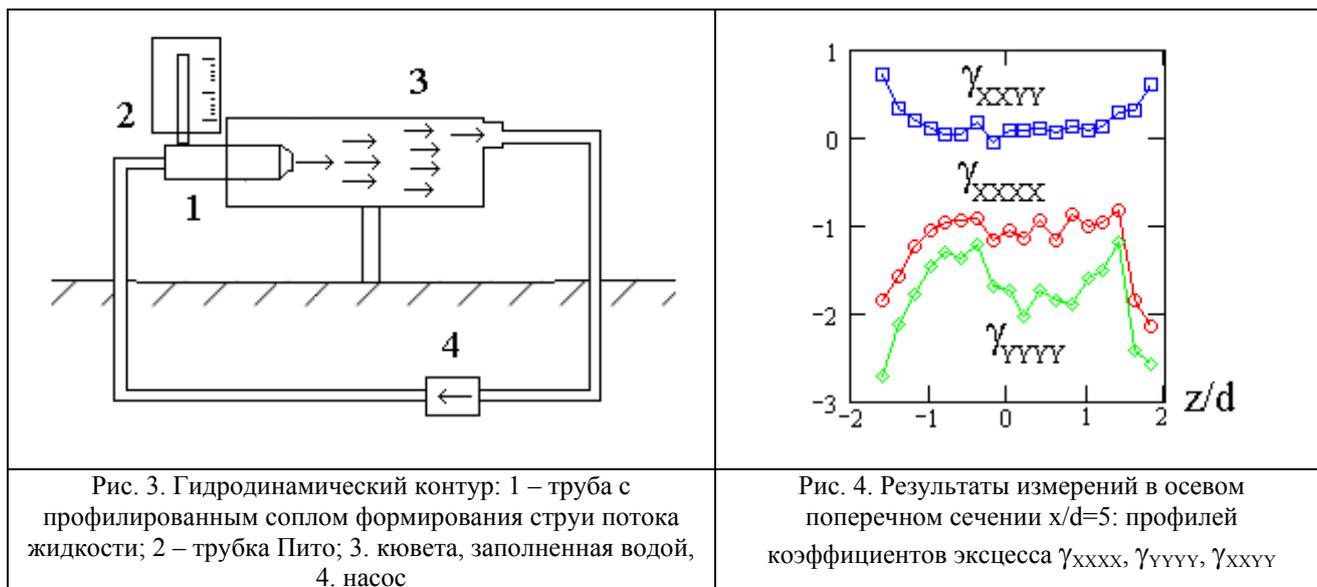
Измерения в турбулентной струе

Гидродинамическая часть установки схематично показана на рис. 3. Она позволяла создавать струйное осесимметричное течение в заполненной водой кювете с прозрачными стенками. Начальная скорость на выходе из сопла составляла $U_0=5$ м/с и контролировалась манометром (трубкой Пито). Диаметр сопла составлял $d=3$ мм, что соответствовало турбулентному режиму потока с числом Рейнольдса по диаметру сопла $Re=15000$.

Использовался датчик диаметром 120 мкм и длиной 7 мм. Число Рейнольдса по диаметру датчика при скорости потока $U_0=5$ м/с составляло $Re=600$.

Пример результатов измерений коэффициентов формы представлен на рис.4. Отклонения статистики пульсаций от нормального закона для приосевых областей может быть связано с наличием когерентных вихревых структур в потоке. В периферийных областях могут сказываться перемежаемость и возвратные течения, вызванные особенностями геометрии кюветы и ее конечными размерами.

Нельзя исключать и влияние методических погрешностей, обусловленных оптико-механической конструкцией датчика.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные алгоритмы и программы обработки 2D сигналов ОВЛА позволяют оценивать статистические моменты турбулентных пульсаций и коэффициенты формы распределений скорости высших порядков. На модельных сигналах выполнено тестирование рабочих программ. Приведены примеры практических измерений статистических параметров пульсаций скорости в поперечных сечениях турбулентной струи. Метод позволяет выявить области потока, в которых статистика пульсаций скорости отклоняется от нормального гауссова закона.

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. **Кондаков И.А., Панюков Р.А., Смирнов В.И.** Исследование работы лазерного оптоволоконного датчика турбулентности в струе жидкости. Труды XI Международной научно-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков» Москва, 27-30 июня 2011. Электронная версия трудов конференции. 6 с.

Yu.V. Kerv, I.A. Kondakov, V.I. Smirnov
*Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: omfi@mpei.ac.ru*

**LASER FIBER OPTIC MEASUREMENTS OF THE HIGHER ORDER
TURBULENT STATICAL PARAMETERS**

The fiber-optical laser anemometer is used for 2D higher order statistical characteristics of turbulence. Results of measurements in turbulent round submerged water jet are presented at Reynolds's moderate numbers. The method allows revealing areas of a flow in which the statistics of turbulent pulsations deviates from the normal law.

FIBER OPTIC LASER ANEMOMETER, TURBULENT JET, 2-D MEASUREMENTS,
HIGHER ORDER STATISTICS