

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

2006, том 42, № 4

УДК 681.2.08 + 62-503.5 + 621.3.093

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ
С ПОМОЩЬЮ СЛЕДЯЩЕГО ФИЛЬТРА
КОМПЛЕКСНОЙ ОГИБАЮЩЕЙ ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА***

В. И. Титков, В. В. Лукашов

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
E-mail: luka@itp.nsc.ru*

Описан процессор доплеровского сигнала, представляющий собой следящий фильтр комплексной огибающей, дополненный цифровой системой коррекции ошибки. Исследованы характеристики ЛДА-процессора при измерении турбулентных характеристик газового потока.

Введение. Основные методы оценки частоты доплеровского сигнала лазерных измерителей скорости, или ЛДА, подразделяются на два типа: спектральный в частотной области и счетный во временной области. На ранних этапах развития систем оценки частоты доплеровских сигналов широкое распространение получили схемы следящих фильтров и счетных процессоров [1]. Известно, что при анализе реального зашумленного доплеровского сигнала счетная техника не столь эффективна, как спектральные методы. В счетных методах оценки доплеровской частоты требуется, чтобы отношение сигнал/шум было не менее 10. Поэтому в настоящее время в основном используются спектральные методы оценки доплеровского сигнала: быстрое преобразование Фурье (БПФ) и вейвлет-анализ. Так, в работе [2] предложена гибридная архитектура цифрового процессора ЛДА-сигналов, сочетающая в себе вейвлет-анализ и БПФ. Такая схема позволяет в реальном времени получать оценки частоты доплеровского сигнала. В то же время, как отмечается в [3, 4], для получения хороших оценок частоты коротких сигналов требуется, по крайней мере, несколько периодов измеряемой частоты за время ΔT_i существования сигнала. При этом разрешающая способность как по времени, так и по частоте зависит от длительности ΔT_i этого сигнала. В качестве альтернативного метода оценки частоты коротких сигналов можно исполь-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-02-08015) и Президента РФ (грант РИ-112.001.345).

зовать метод квадратурного демодулятора [4]. Он известен давно и предполагает формирование квадратурных пар в виде комплексного сигнала

$$\dot{U}(t) = A(t)\cos\varphi(t) + iA(t)\sin\varphi(t), \quad (1)$$

где $A(t)$ – амплитуда сигнала, а $\varphi(t)$ – фаза. Отмечается [4], что метод демодуляции квадратурных сигналов не имеет ограничений временной разрешающей способности и не зависит от числа периодов сигнала.

Сопоставление различных методов оценки частоты сигнала в условиях присутствия изменяющегося уровня шума, случайного пропадания сигнала, наличия паразитной амплитудной и фазовой модуляции сигнала показало, что следящая система обладает большим динамическим диапазоном и высокой помехоустойчивостью, сопоставимой с методами фурье-преобразования. Нами была разработана схема следящего фильтра [5], основанная на выделении комплексной огибающей доплеровского сигнала. Аппаратура в течение длительного времени использовалась для исследования широкого класса задач: процессов горения [6], течения жидкости в засыпках [7], закрученных потоков газа [8]. Однако при скачках частоты доплеровского сигнала она обладает существенными динамическими ошибками, что ограничивает ее использование при изучении турбулентных течений. Указанный недостаток можно устранить, формируя сигналы коррекций и синхронизируя их с работой следящего фильтра.

В данной работе приведена функциональная схема следящего процессора комплексной огибающей доплеровского сигнала с цифровой коррекцией показаний следящего фильтра. Представлены результаты тестовых экспериментальных исследований турбулентных характеристик воздушной струи, подтверждающие существенное улучшение точности характеристик созданного процессора.

Архитектура ЛДА-процессора с коррекцией следящей системы. Как показано на рис. 1, комплексный доплеровский сигнал $U^*(t) = A(t)e^{j(\omega_d t + \varphi)}$ поступает на перемножитель П, на опорный вход которого также поступает комплексный сигнал $e^{-j\omega_r t}$ с генератора с управляемой частотой (ГУЧ). В результате на выходе перемножителя формируется сигнал с одной боковой полосой $A(t)e^{j[(\omega_d - \omega_r)t + \varphi_0]}$.

Далее сигнал разностной частоты $\Delta\omega = \omega_d - \omega_r$ фильтруется в блоке Ф. Напряжение на выходе этого фильтра по существу является комплексной огибающей входного сигнала, поскольку в режиме слежения разностная частота стремится к нулю. С выхода фильтра Ф сигнал подается на вход блока схемы оценки формирования фазы, амплитуды и знака (СОФАЗ).

Выделенные в этом блоке сигналы фазы и квадрата амплитуды поступают на асинхронный дельта-модулятор (ДМ), с помощью которого формируется знаковая импульсная последовательность $L(t_i)$ приращений набега фазы разностной частоты $\Delta\varphi(t) = \Delta\omega t$ за время ΔT_i существования доплеровского сигнала с учетом ее знака. Шаг дискретности фазы при этом равен $\pi/2$, а время ΔT_i определяется длительностью стробирующего импульса, формируемого из амплитуды $A^2(t)$ при превышении ею заданного порога. Далее импульсная последовательность $L(t_i)$ интегрируется в накопительном сумматоре С, где формируется код $N(t_i)$ управления частотой ГУЧ. Таким образом, замыкается цепь обратной связи и ГУЧ следит за частотой допле-

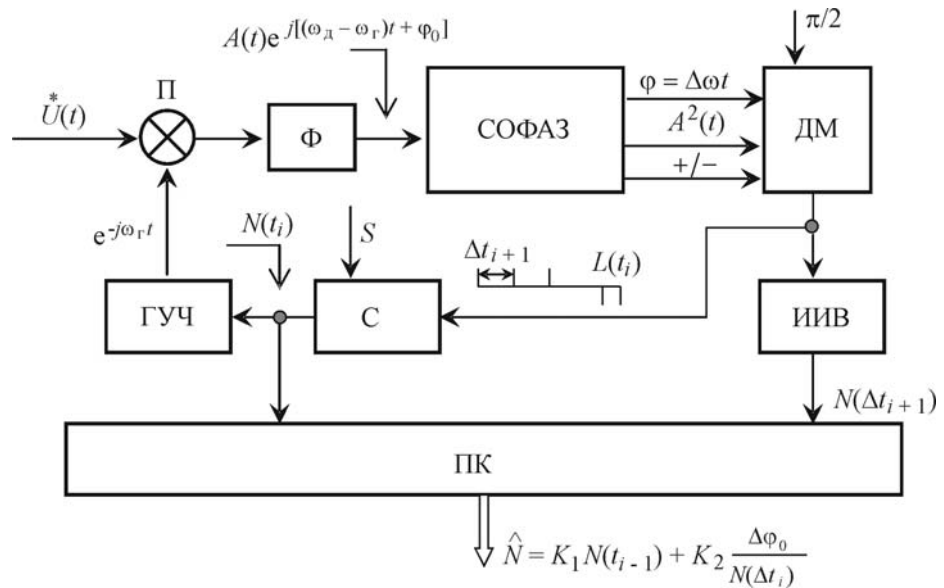


Рис. 1. Структурная схема программно-управляемого следящего фильтра

ровского сигнала. При этом, как отмечалось выше, точность слежения оказывается недостаточной. Для того чтобы повысить точность измерения, вводится цепь коррекции показаний следящего фильтра. Она содержит измеритель интервалов времени (ИИВ) Δt_{i+1} между импульсами последовательности $L(t_i)$. Код $N_y(t_i)$ управления ГУЧ и код времени $N_t(t_i)$ поступают в память персонального компьютера (ПК), где осуществляется коррекция показаний следящего фильтра в соответствии с выражением

$$N = K_1 N_y(t_{i-1}) + K_2 \frac{1}{N_t(\Delta t_i)}. \quad (2)$$

Здесь K_1 – коэффициент пропорциональности между кодом управления ГУЧ и его частотой; K_2 – коэффициент пропорциональности частотной ошибки и длительности интервалов времени между импульсами разностной частоты. Таким образом, последовательность кодов N соответствует доплеровской частоте и мгновенной скорости исследуемого потока.

Результаты тестирования измерительной системы. Измерительная система включает в себя оптический блок, следящий фильтр, интерфейс сопряжения с ПК и программное обеспечение. Тестовые испытания следящего фильтра осуществлялись путем оценки характеристик воздушной струи, вдуваемой в неподвижную атмосферу. В качестве оптической части применялся оптический блок доплеровского измерителя скорости АВС [9], позволяющего проводить измерения двух компонент скорости в режиме обратного рассеяния света. В качестве источника когерентного излучения использовался полупроводниковый лазерный модуль с длиной волны 660 нм. Мощность излучателя составляла 50 мВт. Мощность излучения, поступающего в измерительный объем, не превышала 17 мВт. В качестве светорассеивающих час-

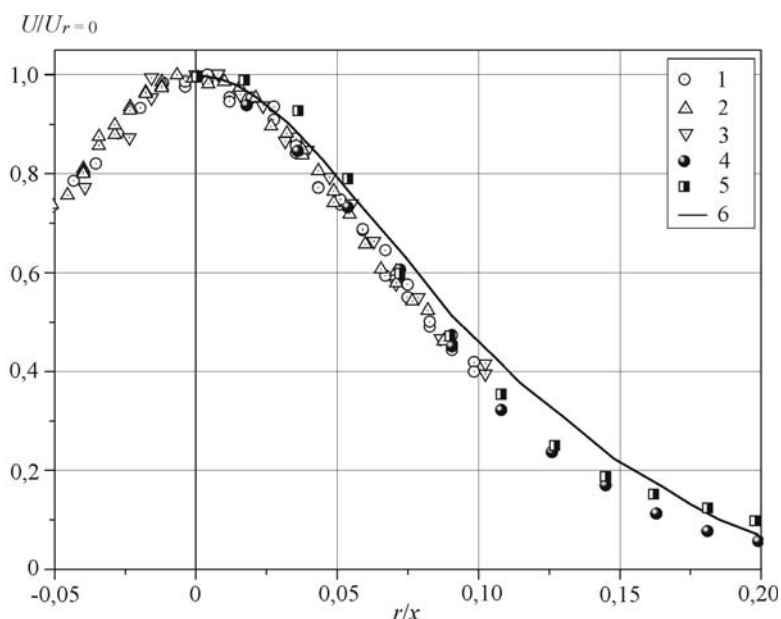


Рис. 2. Распределение средней скорости в затопленной турбулентной струе: 1 – $x/D = 10$, 2 – $x/D = 15$, 3 – $x/D = 20$ при числе Рейнольдса $Re = 8500$; данные работы [10] при $x/D = 25$: 4 – $Re = 16000$, 5 – $Re = 5500$; линия 6 – обобщение измерений [11]. Здесь $Re = U_0 D / \nu$, где U_0 – скорость на срезе сопла при $x = 0$, ν – вязкость воздуха

тиц использовался дым, образующийся при сжигании глицерина. Струя воздуха вытекала из низкотурбулентного профилированного сопла (тарировочное сопло фирмы DISA диаметром $D = 12,4$ мм). Комнатный воздух практически не содержал пыли. Таким образом создавался градиент объемной концентрации частиц как вдоль по потоку, так и в поперечных сечениях струи, оказывающий влияние на оценки измеряемых величин. При измерении профиля скорости концентрация частиц в потоке могла изменяться на два порядка.

Поперечное распределение средних значений продольной компоненты скорости в различных сечениях области развитого турбулентного потока ($x/D \geq 10$) показано на рис. 2. Эти значения (светлые значки) хорошо согласуются с данными, полученными другими авторами. Итак, можно утверждать, что созданный процессор дает правильные оценки средней скорости несмотря на наличие градиентов концентрации рассеивающих частиц. Реализованное струйное течение, как следует из рис. 2, не обладает какими-либо особенностями и может быть использовано в качестве тестового объекта для оценки качества процессора или для измерений характеристик турбулентности.

Программное обеспечение позволяет осуществлять выбор параметров ЛДА-процессора: усиление доплеровского сигнала, диапазон рабочих частот ГУЧ, полосу пропускания фильтров Φ , частоту заполнения счетчика – измерителя интервалов времени, быстродействие следящего фильтра S . Величина S определяет шаг дискретности слежения и задается двоичным числом, пропорциональным приращению частоты на каждый импульс последова-

тельности $L(t_i)$. Например, если диапазон ГУЧ 20 МГц, а максимальный код управления $N_{\max} = 2^{16} - 1$, то при $S = 1$ минимальный шаг дискретности

$$\Delta F_{\min} = \frac{20 \cdot 1}{2^{16} - 1} \approx \frac{20}{65000} \simeq 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ МГц.}$$

При изменении шага дискретности меняется постоянная времени цепи обратной связи, которая прямо пропорциональна величине этого шага и таким образом определяет скорость слежения.

В аппаратуре предусмотрена возможность программного управления способом дискретизации по времени по регулярному или нерегулярному закону. Регулярная дискретизация удобна для изучения спектральных характеристик турбулентности с использованием алгоритмов БПФ. А нерегулярная дискретизация при использовании дискретной импульсной последовательности $L(t_i)$, знака, частоты или их комбинаций полезна для изучения статистических свойств турбулентности, так как позволяет получить всю информацию, содержащуюся в доплеровском сигнале. Во всех режимах ПК формирует две последовательности: U_i^S – оценки значений скорости следающего фильтра и U_i^C – значения коррекций скорости, из которых формируется результирующая оценка U_i^R скорости i -й светорассеивающей частицы.

Оценки функции плотности вероятности пульсаций скорости U_i^S , U_i^R , U_i^C на оси струи при удалении от среза сопла на расстояние $x = 15D$ показаны на рис. 3 (скорость на срезе $U = 10$ м/с). Гистограмма оценок следающего фильтра U_i^S обладает заметной несимметрией, обусловленной смеще-

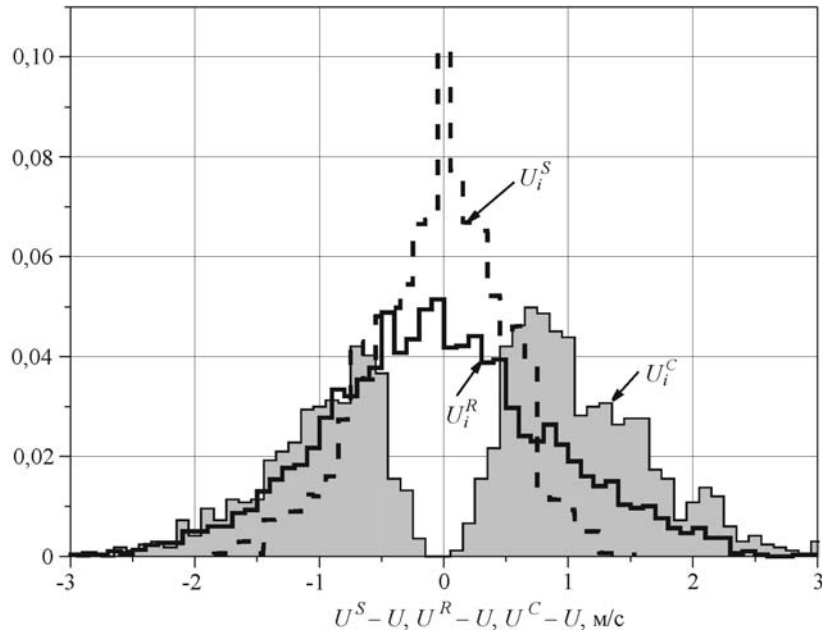


Рис. 3. Гистограммы значений U_i^S , U_i^R , U_i^C

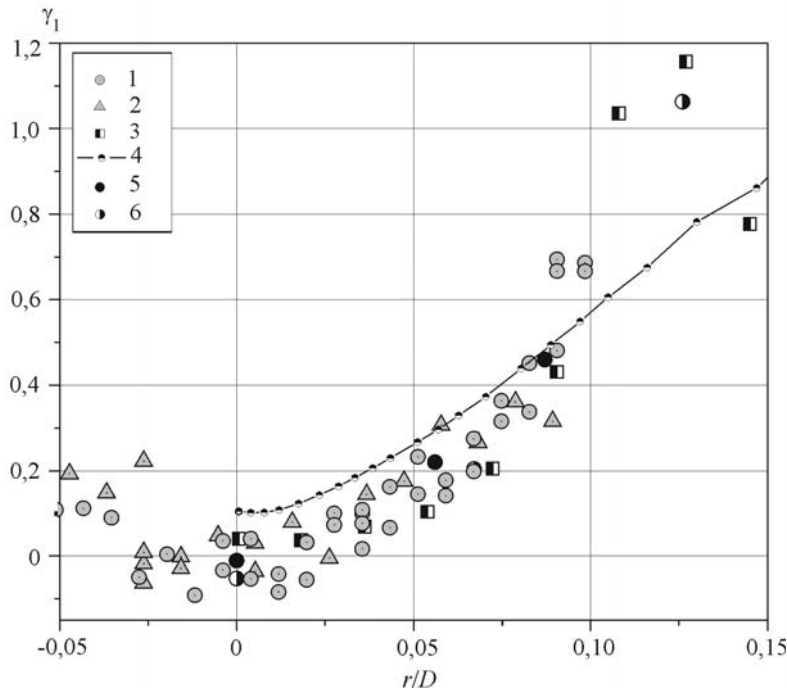


Рис. 4. Распределение коэффициента асимметрии γ_1 в поперечном сечении турбулентной струи: данные авторов: 1 – $x/D = 10$, 2 – $x/D = 15$; 3 – данные [10], полученные методом PIV в сечении $x/D = 25$, $Re = 16000$; 4 – данные [11], термоанемометр с подвижным датчиком и ЛДА, $x/D = 70$, $Re = 95500$; 5 – данные [12], термоанемометр, $x/D = 57$, $Re = 71000$; 6 – данные [13], термоанемометр, $x/D = 15$, $Re = 30000$

нием в область меньших значений скорости. Значения коррекций U_i^C , выработанных счетной системой, смещены, наоборот, в область больших значений. Такое смещение при измерении в турбулентных потоках характерно для счетных и спектральных методов оценки доплеровского сигнала [1]. Для того чтобы избежать смещения оценок, в эти методы при обработке обычно вводятся весовые коэффициенты p_i , $U_i = p_i \tilde{U}_i$. Для определения значения p_i часто используют время существования строба ΔT_i . При этом требуется организовать равномерное запыление исследуемого течения светорассеивающими частицами, что не всегда возможно. В нашем случае система обрабатывает сигнал «ошибки» следящего фильтра и не только исключает необходимость введения таких весовых коэффициентов, но и существенно улучшает динамические характеристики измерительной системы. На рис. 4 показаны профили коэффициента асимметрии γ_1 значений продольной компоненты скорости в поперечном сечении турбулентной струи. Коэффициент

$$\gamma_1 = \frac{\sum_i^M (u_i - U)^3}{M} \left/ \left(\frac{\sum_i^M (u_i - U)^2}{M} \right)^{3/2} \right. \quad \text{характеризует симметричность функции}$$

плотности вероятности случайной величины. Здесь M – количество отсчетов в выборке. Видно, что значения γ_1 соответствуют результатам, полученным с

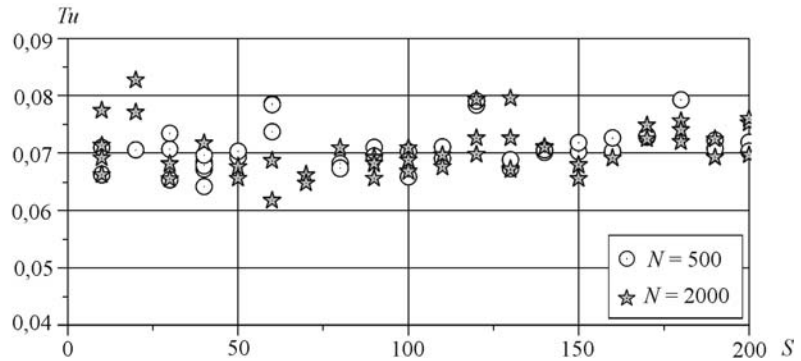


Рис. 5. Оценки интенсивности пульсаций продольной компоненты скорости при изменении

быстродействия следящего фильтра. Здесь $Tu = \frac{\sqrt{\sum_i^M (u_i - U)^2 / M}}{U_{r=0}}$

помощью термоанемометра и метода PIV (Particle Image Velocimetry). Описываемая архитектура ЛДА-процессора не изменяет статистических свойств измеряемой величины даже в условиях значительного градиента концентрации светорассеивающих частиц. Если на оси струи (при $r = 0$) счетная концентрация N была порядка 1000, то на периферии струи ($r/D \approx 0,1$) N изменялась в диапазоне 1–100. Таким образом, в отличие от представленных в лите-

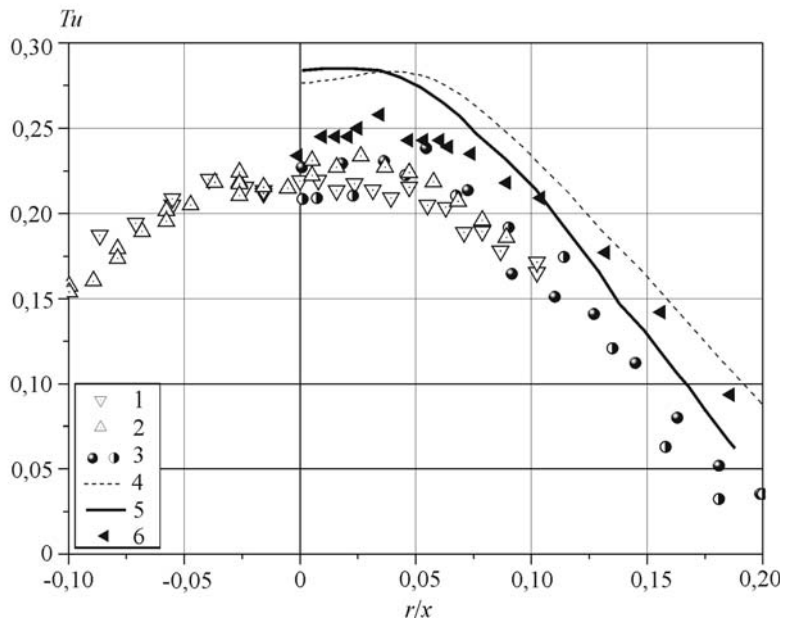


Рис. 6. Распределение степени турбулентности: 1 – $x/D = 15$; 2 – $x/D = 20$; 3 – данные [10], метод PIV; 4 – термоанемометр с подвижным датчиком, данные [11]; 5 – термоанемометр, данные [14]; 6 – термоанемометр с подвижным датчиком, данные [15]

ратуре счетных измерительных систем в данном случае не требуется вводить в обработку какие-либо весовые функции p_i .

По сравнению со следящей системой [5] важной особенностью рассматриваемой доплеровской измерительной системы является практически полное отсутствие зависимости оценок интенсивности пульсаций скорости от параметра быстродействия S следящего фильтра и счетной концентрации N . Как видно из представленных на рис. 5 данных, показания измерительной системы существенно не меняются при изменении параметра быстродействия в 20 раз, счетной концентрации от 500 до 2000.

Сопоставление результатов измерений степени турбулентности в поперечных участках струи с уже опубликованными результатами представлено на рис. 6. Данные расходятся между собой, что, по-видимому, может быть вызвано как различием условий проведения опытов, так и различием экспериментальных методик. Результаты наших измерений, выполненных в условиях сильного градиента концентрации светорассеивающих частиц, удовлетворительно согласуются с известными данными, что позволяет сделать вывод о правильности используемого технического решения.

Заключение. В данной работе описан процессор доплеровского сигнала, представляющий собой следящий фильтр комплексной огибающей доплеровского сигнала с системой коррекции сигнала ошибки слежения по разностной частоте. Исследованы характеристики ЛДА-процессора при измерении турбулентных характеристик газового потока. Результаты исследования демонстрируют эффективность работы аппаратуры в условиях изменения быстродействия следящего фильтра и большого градиента концентрации светорассеивающих частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lading L.** Spectrum analysis of LDA signals // Dantec Information. 1987. N 5.
2. **Ibrahim K. M., Bachalo W. D.** A real-time Fourier analysis LDV signal processor; another step towards reliable turn-key flow diagnostics // Proc. 41th Intern. Instrumentation Symp. Colorado, 1995.
3. **Гринев С. Н., Игнатьев В. К., Никулин А. В.** Спектральное оценивание частоты сигналов с медленно меняющейся амплитудой // Радиотехнические измерения. 2001. № 8. С. 34.
4. **Czaske J.** Statistischer Fehler der Mittenfrequenzmessung am Beispiel von Laser Doppler-Signalen // Экспресс-информация, КИТ. 2000. № 23. С. 31.
5. **Василенко Ю. Г., Гаврилов В. А., Григорьев В. Н. и др.** Лазерный доплеровский измеритель скорости «Поток-1» с программируемыми режимами работы // 1-й Всесоюз. сем. «Оптические методы исследования потоков». Новосибирск, 1989. С. 11.
6. **Волков В. А., Мухин Н. С., Накоряков В. Е.** Исследование структуры течения в пористой среде // ЖПХ. 1981. № 6. С. 58.
7. **Бояршинов Б. Ф., Волчков Э. П., Терехов В. И.** Структура течения и тепломассообмен в пограничном слое с фронтом горения // Процессы переноса в одно- и двухфазных средах. Новосибирск, 1986. С. 88.
8. **Volchkov E. P., Lebedev V. P., Lukashov V. V.** The LDA study of flow gas-dynamics in a vortex chamber // Intern. Journ. HeatMass Tr. 2004. 47, N 1. P. 35.
9. **Дубнищев Ю. Н., Арбузов В. А., Белоусов П. П., Белоусов П. Я.** Оптические методы исследования потоков. Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2003.

10. **Weisgraber T. H., Liepmann D.** Turbulent structure during transition to self-similarity in a round jet // Experiments in Fluids. 1998. **24**. P. 210.
11. **Hussein H. J., Capp S. P., George W. K.** Velocity measurements in a high-Reynolds-number, momentum-conserving, axisymmetric, turbulent jet // Journ. Fluid Mech. 1994. **258**, N 10. P. 31.
12. **Ribeiro M. M., Whitelaw J. H.** Statistical characteristics of a turbulent jet // Journ. Fluid Mech. 1975. **70**, N 1. P. 1.
13. **Venkataramani K. S., Tutu N. K., Chevray R.** Probability distributions in a round heated jet // Phys. Fluids. 1975. **18**, N 11. P. 1413.
14. **Wynanski I., Fiedler H. E.** Some measurements in the self-preserving jet // Journ. Fluid Mech. 1969. **38**. P. 577.
15. **Panchapakesan N. R., Lumley J. L.** Turbulence measurements in axisymmetric jets of air and helium. Pt. 1. Air jet // Journ. Fluid Mech. 1993. **246**. P. 197.

Поступила в редакцию 22 августа 2005 г.
