

откуда коэффициент корреляции скоростей u_1^i и u_2^j равен

$$R_{12}^{ij} = (\mu_1 + \mu_2 - \mu_-) / 2 \sqrt{\mu_1 \mu_2}. \quad (6)$$

Результаты контрольных измерений, проведенных по методике, основанной на соотношении (4), в осевой области турбулентной струи [6] на расстоянии 20 калибров от среза сопла представлены на рис. 4, а и б. На рис. 4, а показана зависимость коэффициента корреляции продольных составляющих скорости от расстояния между точками измерений при их разнесении вдоль оси потока, на рис. 4, б — зависимость коэффициента корреляции продольных и поперечных пульсаций скорости в одной и той же точке от относительного расстояния до оси потока.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности практического использования разработанного двухканального доплеровского измерителя в гидродинамических исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ринкевичюс Б. С. Лазерная анемометрия. — М.: Энергия, 1978.
2. Morton J. B., Clark W. H. Measurement of Two-Point Velocity Correlation in a Pipe Flow Using Laser Anemometers. — J. Phys. E: Scientific Instruments, 1971, vol. 4, p. 36—44.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1970.
4. Ринкевичюс Б. С., Смирнов В. И. Оптические доплеровские измерения пространственной структуры турбулентности. — Труды МЭИ, 1979, вып. 422.
5. Гуменник Е. В., Смирнов В. И. Согласование рассеянных световых пучков доплеровского измерителя пространственной структуры турбулентности. — Труды МЭИ, 1979, вып. 422.
6. Ринкевичюс Б. С., Смирнов В. И. Оптический доплеровский метод исследования турбулентных потоков с использованием спектрального анализа сигнала. — Квант. электроника, 1973, № 2 (14).

Поступило в редакцию 13 января 1981 г.;
окончательный вариант — 8 декабря 1981 г.

УДК 532.574

В. А. БЕЗУГЛОВ, В. А. МОГИЛКО, Ю. А. ЦЕРБИНА
(Москва)

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕНОСА ПАССИВНОЙ ПРИМЕСИ С ПОМОЩЬЮ ЛДИС

В последнее время интенсивно развивается новое перспективное направление в теории турбулентности, связанное со статистическим описанием связи величин, характеризующих турбулентное движение сред [1, 2]. Эта связь выражается через совместные функции плотности распределения вероятности (СФПВ). Теоретические модели являются полуэмпирическими и поэтому требуют проведения систематических экспериментальных исследований. Большие надежды здесь связываются с использованием ЛДИС. К сожалению, получение аналогового сигнала скорости в многочастичном режиме ЛДИС в условиях перемежающейся и сильно флуктуирующей концентрации примеси сопряжено с большими трудностями, носящими иногда принципиальный характер. В данной работе предлагается метод измерения СФПВ скорости и концентрации примеси с помощью ЛДИС. Метод не требует преобразования доплеровской частоты в напряжение и позволяет обойтись серийными приборами. Первые измерения СФПВ при помощи ЛДИС были описаны в работе [3].

Предлагаемая методика измерения СФПВ концентрации и скорости сохраняет преимущества методики [3] и вместе с тем позволяет в значительной мере сократить время измерений и объем обработки результатов. Она является развитием следующей известной идеи. Если на входы X и Y осциллографа поданы два случайных сигнала, то электронный луч выписывает на экране некоторые траектории. Нетрудно видеть, что суммарное время пребывания электронного луча в окрестности любой точки экрана за достаточно длительный период наблюдения есть величина СФПВ этих случайных сигналов. Случайная функция скорости сканируется по амплитуде, что для сигнала ЛДИС эквивалентно сканированию по частоте, а яркость луча осциллографа включается специальным устройством в моменты времени, когда доплеровская частота попадает в полосу пропускания спектроанализатора.

Блок-схема регистрирующей части экспериментальной установки для измерения СФПВ скорости и концентрации показана на рис. 1. Она состоит из светоприем-

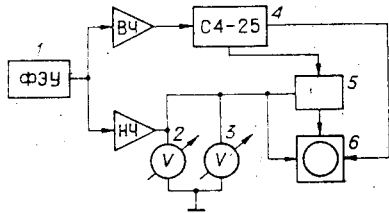


Рис. 1.

диаграма 1, усилителей высокочастотной (ВЧ) и низкочастотной (НЧ) составляющих доплеровского сигнала, интегрирующего вольтметра 2, квадратичного вольтметра 3, спектроанализатора 4, блока управления яркостью луча осциллографа 5 и осциллографа 6. Низкочастотная составляющая сигнала ЛДИС, которая для дифференциальной схемы в многочастичном режиме пропорциональна [4] концентрации светорассеивающих частиц в измерительном объеме, контролируется вольтметрами 2 и 3, измеряющими среднее и среднеквадратичное значения сигнала концентрации. Одновременно она подается на вертикальные пластины осциллографа 6 и усилитель постоянного тока (УПТ) в блоке управления яркостью луча 5. Высокочастотная составляющая сигнала ЛДИС, мгновенная частота которой пропорциональна скорости частиц примеси, поступает на спектроанализатор 4, работающий в режиме измерения мощности. Развертка горизонтальной оси осциллографа 6 синхронизирована с разверткой спектроанализатора 4 так, что горизонтальная координата положения луча соответствует в каждый момент времени частоте пропускания узкополосного фильтра спектроанализатора. Сигнал со спектроанализатора подается на блок управления яркостью луча в осциллографе 5, включая ее при попадании доплеровской частоты в полосу пропускания спектроанализатора. Блок управления яркостью состоит из УПТ с регулируемым коэффициентом усиления и компаратора, на один вход которого подается сигнал спектроанализатора, а на другой — сигнал с выхода УПТ. Компаратор включает яркость луча осциллографа, когда сигнал со спектроанализатора превышает сигнал УПТ.

Сигнал с ФЭУ включает в себя дробовые шумы, спектральная плотность которых пропорциональна мгновенной концентрации пассивной примеси $C(t)$. Пусть мгновенная доплеровская частота находится вне полосы пропускания узкополосного фильтра спектроанализатора. Тогда функция плотности вероятности (ФПВ) выходного сигнала u спектроанализатора есть

$$P(u) = [NC(t)]^{-1} \exp[-u/NC(t)], \quad u \geq 0,$$

где $NC(t)$ — мгновенная мощность шумов в полосе пропускания спектроанализатора, который, как отмечалось, работает в режиме измерения мощности. Если мгновенная доплеровская частота находится в пределах полосы пропускания узкополосного фильтра спектроанализатора, то в многочастичном режиме ЛДИС

$$P(u) = [(N+S)C(t)]^{-1} \exp[-u/(N+S)C(t)], \quad u \geq 0,$$

$SC(t)$ — мгновенная мощность доплеровского сигнала. Предполагается, что уширение доплеровского сигнала меньше полосы пропускания спектроанализатора.

Чтобы избежать ложных шумовых срабатываний блока управления яркостью луча осциллографа и исключить корреляцию между вероятностью срабатывания этого блока и величиной концентрации, порог дискриминации компаратора выбирается пропорциональным мгновенному значению поступающего с УПТ сигнала, который, в свою очередь, пропорционален концентрации $u_1 = bC(t)$. В этом случае вероятности ложных $\exp(-b/N)$ и правильных срабатываний $\exp[-b/(N+S)]$ не зависят от концентрации примеси. Коэффициент усиления УПТ b подбирается таким образом, чтобы при значении сигнала концентрации, близком к среднему, дробовые шумы практически не вызывали срабатывания компаратора. Осредненное по времени свечение экрана осциллографа с точностью до постоянной составляющей, вызванной шумами, пропорционально СФПВ скорости и концентрации. Метод, естественно, не позволяет измерить ФПВ скорости переноса нулевых концентраций. Экран осциллографа фотографируется с достаточной выдержкой, и полученные таким образом негативы фотометрируются на микрофотометре.

Описанный метод был использован для изучения СФПВ продольной скорости и концентрации в круглой затопленной воздушной струе. В качестве пассивной примеси, равномерно метившей вещество струи, служили пары машинного масла, вырабатываемые в специальном дымогенераторе.

В дифференциальной схеме ЛДИС применялся одномодовый лазер ЛГ-38А. Характерный размер измерительного объема 0,2 мм. Полосы пропускания ВЧ- и НЧ-каналов составляли соответственно 0,25—40 МГц и 0—30 кГц. Постоянная ЛДИС была равна 0,556 МГц/м/с.

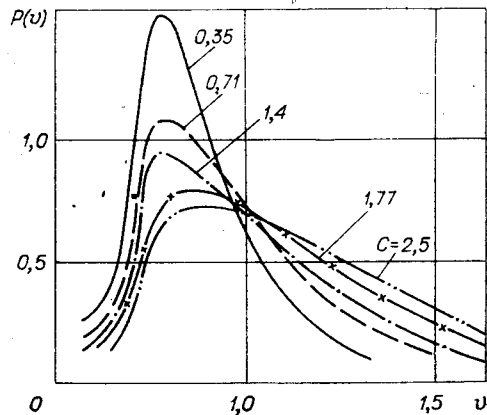


Рис. 2.

В схеме регистрации использовались следующие серийные приборы: спектроанализатор С4-25, квадратичный вольтметр ВЗ-28А, интегрирующий вольтметр В2-23, осциллограф С1-15.

В качестве примера на рис. 2 приводятся условные ФПВ пульсаций скорости $P(v)$ при различных значениях концентрации. Величины скорости и концентрации нормированы на их средние значения в точке измерения. Кривые относятся к точке, находящейся на расстоянии 20 калибров от среза сопла и 2,6 калибра от оси струи, истекающей из сопла диаметром 5 мм, профиль которого выполнен по Витопинскому. Средние скорости на срезе сопла и в точке измерения были равны соответственно 48,6 и 4,2 м/с. Средняя скорость измерялась трубкой Пито.

В заключение следует отметить, что изложенная выше методика может быть, по-видимому, использована для измерения совместных функций плотности распределения вероятности пульсаций скорости и других скалярных величин в турбулентных течениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иевлев В. М. Турбулентное движение высокотемпературных сред.— М.: Наука, 1975.
2. Монин А. С. Уравнения для конечномерных распределений поля турбулентности.— ДАН, 1967, т. 177, № 5.
3. Безуглов В. А. Исследование совместной функции распределения турбулентных пульсаций скорости и концентрации примеси.— Труды МФТИ. Аэромеханика. Процессы управления. Долгопрудный: изд. МФТИ, 1974.
4. Щербина Ю. А. Многочастичные доплеровские измерители скорости и концентрации: Учебное пособие/Под ред. чл.-кор. АН СССР В. М. Иевлева.— Долгопрудный: изд. МФТИ, 1978.

Поступило в редакцию 27 января 1981 г.

УДК 532.574.7

П. Я. БЕЛОУСОВ
(Новосибирск)

ИЗМЕРИТЕЛЬ ЛОКАЛЬНОЙ СКОРОСТИ НА ОСНОВЕ СКАНИРУЕМОГО ОПТИЧЕСКОГО ЧАСТОТНОГО ДИСКРИМИНАТОРА

Применение методов оптической обработки информации с использованием оптических частотных дискриминаторов (ОЧД) позволяет отказаться от сложных электронных устройств обработки сигналов в лазерных доплеровских анемометрах и работать с узкополосными низкочастотными фотоприемниками. Измерители с оптической обработкой сигнала в отличие от гетеродинных систем с электронными процессорами свободны от влияния фазовых шумов, снижающих точность измерения скорости. Устройства с ОЧД могут работать в широком динамическом диапазоне интенсивностей световых сигналов, в том числе при малых уровнях, когда традиционные лазерные доплеровские анемометры функционируют только с корреляторами фотоотчетов.

В [1, 2] сообщается об измерителе локальной скорости с ОЧД на основе конфокального интерферометра, работающего в режиме непрерывного слежения за частотой светового сигнала. Недостаток таких измерителей заключается в необходимости применения систем автоподстройки частоты (АПЧ), представляющих собой достаточно сложные электронные устройства. В данной работе сообщается об измерителе скорости, в котором формирование зондирующего когерентного оптического сигнала осуществляется сканирующим ОЧД, одновременно выполняющим частотную дискриминацию рассеянного исследуемым объектом светового пучка. Измеритель, работающий по такому принципу, не нуждается в системах АПЧ.

Определим форму сигнала на выходе измерителя, используя в качестве дискриминатора многолучевой интерферометр. Интенсивность зондирующего исследуемый объем лазерного пучка, сформированного ОЧД, задается формулой [1]

$$I_1 = I_0 [1 + A^2(v - v_0)^2]^{-1}. \quad (1)$$

Здесь I_0 — интенсивность лазерного пучка, v — частота лазера, v_0 — частота настройки интерферометра, A — постоянная, характеризующая аппаратную функцию многолучевого интерферометра. Интенсивность рассеянного в выбранном направлении света обусловлена $I_1 |s|^2$, где s — функция рассеяния. Частота рассеянного света равна $v + \Delta v_D$, Δv_D — доплеровский сдвиг. После частотной дискриминации