

эффицент рассеяния $|s|^2$ был постоянен при времени интегрирования $\tau \sim 1/n$ (n — число оборотов вращающегося диска в секунду).

На рис. 2 приведена экспериментально полученная дискриминационная кривая измерительного устройства. Кривая снята с экрана осциллографа. В вертикальном направлении луч осциллографа управлялся сигналом с тахогенератора, а в горизонтальном — сигналом с интегратора 13. Сигнал с тахогенератора пропорционален скорости движения объекта, а сигнал с интегратора — I_{2cp} . Начало кривой соответствует нулевой скорости, а конец — скорости 30 м/с.

При определении средней скорости величина $|s|^2$ для заданной среды может считаться постоянной, что дает возможность обходиться измерением I_{2max} либо I_{2cp} с помощью вольтметра, подключенного к выходу фотоприемника. Устройство позволяет измерять динамику изменения скорости, если частоты пульсаций скорости не превышают $1/\tau$, где τ — такое время усреднения $I_0|s|^2$, при котором отклонение $I_0|s|^2$ от средней величины удовлетворяет выбранной точности измерения пульсаций скорости.

В заключение автор выражает благодарность Ю. Н. Дубнищеву за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н., Павлов В. А. Лазерный измеритель скорости с применением оптического дискриминатора доплеровской частоты.— *Опт. и спектр.*, 1977, т. 43, с. 775.
2. Belousov P. Ya., Dubnistchev Yu. N. The Application of an Optical Doppler Frequency Discriminator in a Laser Velocimeter.— *Optics and Laser Technology*, 1977, N 5, p. 229.
3. Лазерные доплеровские измерители скорости/Ю. Г. Василенко и др.— Новосибирск: Наука, 1975, с. 10.

Поступило в редакцию 5 января 1981 г.

УДК 621.373.826 : 62

А. Р. ЕВСЕЕВ
(Новосибирск)

ЛАЗЕРНЫЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ СО СВЕТОВОДОМ

В настоящее время ЛДИС широко внедряются в практику гидроаэродинамического эксперимента благодаря таким преимуществам, как бесконтактность и широкий диапазон измеряемых скоростей. Применение лазерных доплеровских анемометров для исследований двухфазных или многофазных потоков ограничивается не размерами диспергированной фазы, а условием оптической прозрачности среды, которое выполняется до объемной концентрации порядка 3—5%.

Лазерные системы с волоконными световодами в отличие от обычных ЛДИС успешно решают задачу измерения скоростей в оптически непрозрачных средах типа крови [1], а также в высококонцентрированных газожидкостных потоках и двухфазных потоках газа или жидкости с твердыми частицами [2]. Эффект измерения скорости в оптически непрозрачном (в целом) потоке достигается путем помещения световода (или пучка световодов) в заданную малую локальную область потока. Причем информация о скорости движения частиц берется из пространства в непосредственной близости от торца световода [3]. Учитывая достаточно высокую степень когерентности лазерного луча, прошедшего волоконный световод [4], можно предположить, что все основные схемы ЛДИС могут быть практически реализованы с волоконными световодами.

ЛДИС с одним волокном (рис. 1), работающий в режиме с опорным пучком, применен для измерения скорости всплывающих воздушных пузырьков в глицерине. Луч лазера 1 проходит через отверстие в зеркале 2, установленном под углом к направлению луча, и объективом 3 вводится в световод 4. Волоконный световод длиной 12 м с прямыми торцами и диаметром светопередающей сердцевинки 50 мкм (диаметр оболочки 150 мкм)

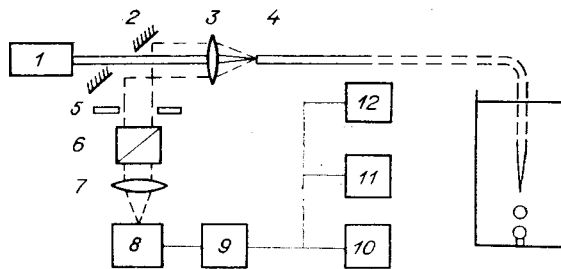


Рис. 1.

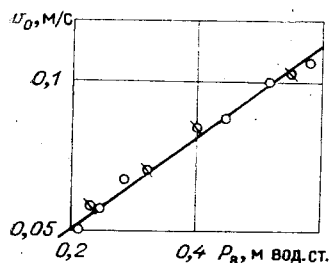


Рис. 2.

Электронная часть системы измерения содержит стандартный набор приборов обычного ЛДИС: фотоприемник 8, фильтр верхних и нижних частот 9, осциллограф 10, анализатор спектра 11, а также процессор для обработки доплеровских сигналов 12 и другие внешние устройства.

Сдвиг частоты рассеянного частицей света, обусловленный эффектом Доплера, определяется выражением [5]

$$\Delta\omega = (K_s - K_0)U, \quad (1)$$

где K_0 и K_s — волновые векторы падающей и рассеянной волн соответственно. Для света, рассеянного назад, $K_0 = -K_s$. Тогда

$$\Delta\omega = 2|K|U_0. \quad (2)$$

Здесь $U_0 = U \cos \alpha$ — проекция вектора скорости на ось световода, α — угол между вектором скорости пузырьков и продольной осью световода. Окончательно связь между скоростью и измеряемой доплеровской частотой F определяется выражением

$$U_0 = F\lambda/2n_l, \quad (3)$$

λ — длина волны лазерного излучения, n_l — показатель преломления исследуемой среды.

На рис. 2 приведены результаты измерения скорости всплывающих пузырьков газа в глицерине, полученные ЛДИС с волоконным световодом (кружки) и обычной дифференциальной схемой ЛДИС (перечеркнутые кружки). Пузырьки образовывались при вдуве газа через отверстие диаметром 0,5 мм. Давление в подводной трубке газа P_0 изменялось до 600 мм вод. ст. Дифференциальная схема ЛДИС работала в режиме рассеяния вперед с углом пересечения лучей $8,9^\circ$. Применялся лазер ЛГ-52-1 с мощностью излучения 8 мВт. При диафрагме 0,3 мм на фотодиоде ФД-10 КП было получено отношение сигнала к шуму ~ 20 дБ. Доплеровская частота сигнала измерялась анализатором спектра СКЧ-13. Для увеличения точности отсчета на вход анализатора подавался сигнал с генератора типа ГЧ-117, частота которого измерялась частотомером ЧЗ-32. Оба метода дают идентичные результаты. Из графика (см. рис. 2) следует, что скорость пузырьков, измеренная двумя методами в одном и том же сечении струйки, линейно возрастает при повышении давления P_0 .

При постоянном давлении P_0 , что соответствует постоянной скорости всплывающих пузырьков, исследована угловая характеристика измерителя с волоконным световодом. В одном и том же сечении оптическое волокно, вставленное в медицинскую иглу, ориентировалось под разными углами относительно струйки пузырьков. Результаты подтверждают, что в данном случае измеряется проекция вектора скорости на ось световода.

Проведенные опыты с относительно крупными пузырьками показали, что в случае накалывания пузырька на световод ($\alpha = 0$) сигнал с фотоприемника имеет 2—3 максимума спектральной плотности.

Характерная форма сигнала изображена на рис. 3, а. Пик зоны 1 соответствует интенсивному сигналу, отраженному от передней стенки пузырька; зона 2 —

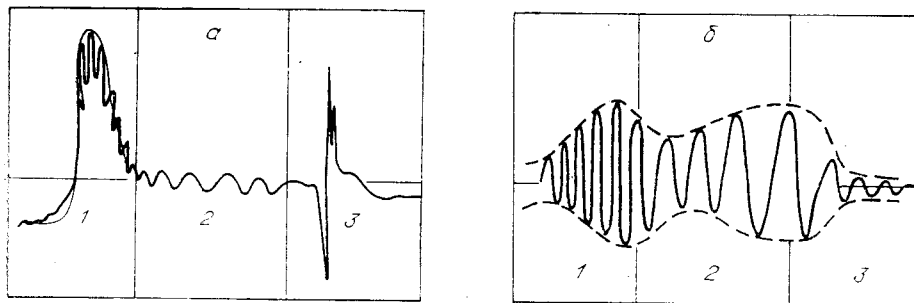


Рис. 3.

накалыванию пузырька на световод, при котором замедляется скорость всплывания пузырька и с его передней кромки затягивается пленка; зона 3 — разрыву пленки с передней стенки пузырька и прокалыванию его задней стенки. На рис. 3, б даны доплеровские сигналы, полученные после фильтрации исходного сигнала.

Анализ показывает, что скорости всплывания пузырька соответствует самый высокочастотный доплеровский сигнал первой зоны. Накалывание пузырька приводит к замедлению скорости его движения (зона 2), что отчетливо видно на экране осциллографа по непрерывному увеличению периода доплеровского сигнала. Своеобразная форма сигнала (см. рис. 3, а) довольно четко определяет переднюю и заднюю границу пузырька, что позволяет построить систему измерения локальной концентрации пузырьков в газожидкостном потоке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tanaka T., Benedek G. V. Measurement of the Velocity of Blood (in Vino) Using a Fiber Optic Catheter and Optical Mixing Spectroscopy.— Appl. Opt., 1975, vol. 14, N 1.
2. Лисицын В. Н., Орлов В. А., Фомин Ю. Н., Чеботаев В. П. Лазерный доплеровский измеритель скорости непрозрачных потоков жидкости и частиц.— В кн.: Труды III Всесоюз. совещания «Экспериментальные методы и аппаратура по исследованию турбулентности». Новосибирск: изд. ИТ СО АН СССР, 1980.
3. Dyott Richard B. System for Detecting Reflected Laser Beams (Andrew Corp.). Filed 21.03.77, N 779361, publ. 15.05.79. Cl. 356/28 (01 D3/36). USA. Pat. 4154529.
4. Кучикян Л. М. Физическая оптика волоконных световодов.— М.: Энергия, 1979.
5. Yeh Y., Cummins H. Localized Fluid Flow Measurements with an He-Ne Laser Spectrometer.— Appl. Phys. Lett., 1964, vol. 4, p. 176.

Поступило в редакцию 21 января 1981 г.;
окончательный вариант — 9 октября 1981 г.

УДК 681.3 : 533.6.08

В. Н. ПТИЦЫН, В. А. ФИЛЬ
(Москва)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛДИС

При экспериментальном определении с помощью ЛДИС таких статистических характеристик пульсаций скорости, как корреляционная функция и спектральная плотность, можно идти двумя путями. Первый заключается в восстановлении мгновенной скорости потока с последующим определением ее корреляционной функции и спектральной плотности [1], второй — в обработке значений мгновенной скорости, полученной в дискретные моменты времени [2]. Первый путь технически реализуется сравнительно просто, но обладает существенными недостатками. Так, например, с уменьшением концентрации светорассеивателей в потоке погрешность восстановления мгновенной скорости резко возрастает [3], а следовательно, резко ухудшается и точность определения корреляционной функции. Значительно лучше в этих условиях определять корреляционную функцию или спектральную плотность непрерывного стохастического процесса по его выборочной корреляционной функции или спектральной плотности. Выборочные характеристики оцениваются (не в реальном масштабе времени) на основании последовательности (выборки) мгновенных значений функции (скорости потока) в моменты дискретизации. Конкретный алгоритм этой процедуры для непрерывного процесса аналогичен описанному в [4]. Для корректного проведения измерения, осуществляемого тактируемой системой с длительностью такта h , в соответствии с алгоритмом [4] необходимо учитывать теорему Котельникова [5] для случайных процессов с ограниченным спектром пульсаций скорости потока $S(f) : S(f) = 0, f > h^{-1}$, иначе возможны значительные ошибки восстановления спектральной плотности вблизи нулевой частоты, не говоря уже об очевидной невозможности восстановления спектральной плотности в области частот $f > h^{-1}$. Процесс дискретизации должен быть стационарен и независим от самого непрерывного процесса (мгновенной скорости потока). Из изложенного выше следует, что при исследовании пульсаций мгновенной скорости в аэродинамических трубах со спектральной плотностью пульсаций до 100 кГц длительность такта измерительной системы должна быть $h \leq 10$ мкс. Такую малую величину h при использовании стандартных и специально разработанных для ЛДИС частотометров, а также известных систем регистрации в настоящее время реализовать практически невозможно. Зависимость средней частоты дискретизации от мгновенной скорости (с увеличением последней средняя частота дискретизации растет) требует модернизации алгоритма.