

ной степени определяется качеством выделения изображений объектов из фона. Тем не менее универсальный метод построения таких функционалов обеспечивает надежную обработку изображений как при неизвестных параметрах геометрических трансформаций, так и при неизвестном виде группы преобразований плоскости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hu M.-K. Visual pattern recognition by moment invariants // IRE Trans. on Informational Theory.— 1968.— V. IT-8, N 2.— P. 179—187.
2. Путьгин Е. П., Лопатченко Б. Н., Левиков В. Б., Абрамов О. М. Автоматическая 1978.
3. Степанов В. П. Курс дифференциальных уравнений.— М.— Л.: ГИТТЛ, 1950.

Поступила в редакцию 3 апреля 1985 г.

УДК 532.529.5 : 621.375.826

А. Р. ЕВСЕЕВ, В. Е. НАКОРЯКОВ, Б. Г. ПОКУСАЕВ,
С. А. ТАЧКОВ, Л. С. ТИМКИН
(Новосибирск)

ИЗМЕРЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА ЛАЗЕРНЫМ АНЕМОМЕТРОМ С ВОЛОКОННЫМ СВЕТОВОДОМ

По сравнению с традиционными схемами лазерных доплеровских измерителей скорости ЛДИС со световодом (оптическое волокно в качестве датчика) имеет ряд особенностей, делающих его применение в некоторых случаях более целесообразным. При исследовании локальных гидродинамических характеристик газожидкостных потоков преимуществами такого измерителя являются: работа в потоках с малой оптической прозрачностью; удаление объекта исследования от основной схемы ЛДИС на расстояние порядка 100 м; измерение пространственного распределения гидродинамических характеристик с достаточно высоким разрешением $\sim 10^{-4}$ м. Основной недостаток — возмущение потока вводимым волоконным датчиком.

Принципиальная возможность применения ЛДИС со световодом рассматривалась в [1, 2] при измерениях скорости крови (*in vivo*); характеристик вибрации твердых тел [3]; скорости пузырьков воздуха в воде [4] и скорости всплытия струйки газовых пузырьков в глицерине [5]. Цель данной работы — изложение методики измерения гидродинамических характеристик газожидкостных потоков методом ЛДИС со световодом и анализ полученных результатов.

Экспериментальная установка и принципы измерения. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Линейно-поляризованное излучение He-Ne-лазера 1 ($\lambda = 0,6328 \cdot 10^{-6}$ м, $P = 10^{-2}$ Вт), пройдя через отверстие зеркала 2, установленного под углом к направлению луча, короткофокусным объективом 3 фокусируется на прямой торец многомодового световода 4 (длина ~ 10 м, диаметр светопередающей сердцевины $50 \cdot 10^{-6}$ м). Волоконный световод с помощью координатного устрой-

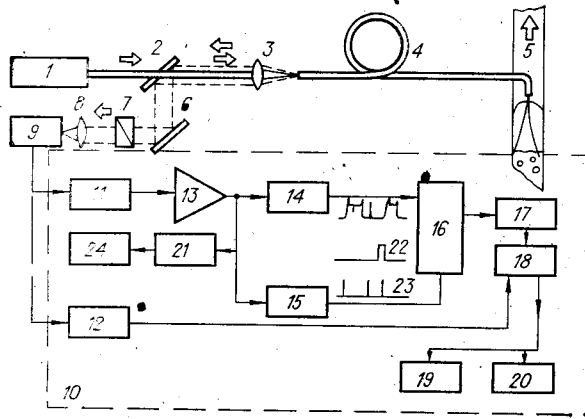


Рис. 1

плоскость пропускания фильтра устанавливается ортогонально плоскости поляризации лазера. Опорным пучком в данной схеме является излучение, отраженное от выходного торца световода. В результате интерференции опорного и объектного пучков фототок приемника 9 оказывается модулированным с частотой, пропорциональной скорости движения межфазной границы. Таким образом, рассматриваемая схема по принципу действия аналогична схеме с опорным пучком обычного лазерного доплеровского анемометра, работающего в режиме рассеяния назад.

Измеряемый доплеровский сдвиг частот определяется известным выражением

$$f_D = 2n|V| \cos \alpha / \lambda, \quad (1)$$

где V — скорость потока; n — коэффициент преломления среды; α — угол между осью световода и вектором скорости межфазной границы. При $\lambda = 0,6328 \cdot 10^{-6}$ м, $n = 1,33$ — вода, $\alpha = 0$ и $V = 1,0$ м/с доплеровский сдвиг частот равен 4,2 МГц. Выходное излучение, формируемое световодом с прямыми торцами, представляет собой конус с углом $\Theta = 14^\circ$ при вершине; следовательно, максимальная ошибка определения модуля скорости из-за расхождения зондирующего излучения равна

$$\Delta f_D = \frac{4|V|}{\lambda} \sin^2 \frac{1}{2} (\alpha + \Theta/2) \text{ при } \alpha < \Theta/2; \quad (2)$$

$$\delta = \Delta f_D / f_D = 2 \frac{\sin^2 \frac{1}{2} (\alpha + \Theta/2)}{\cos \alpha}. \quad (3)$$

В наших измерениях δ не превышала 5%. Электрический сигнал фотоприемника поступает на электронную схему 10 и после предварительной обработки анализируется с помощью частотомера Ф5041 24, осциллографа С8-13 19 и анализатора спектра С4-25 20.

Измерение локального газосодержания. Применение ЛДИС со световодом позволяет измерять локальное газосодержание в газожидкостных потоках. Ток в нагрузке квадратичного фотоприемника 9 определяется выражением

$$i_{\Phi} = \eta [I_0 + E_0^2 + E_s^2 + E_s E_0 \cos (2\pi f_D t)], \quad (4)$$

где η — коэффициент, учитывающий квантовую эффективность фотоприемника; I_0 — интенсивность излучения на фотоприемнике, обусловленная отражением от передних поверхностей объектива 3 и световода 4; E_0 , E_s — амплитуды излучений, обусловленные отражениями от выходного торца световода и объектов в газожидкостном потоке. Амплитуда излучения E_s несет в себе информацию о скорости межфазных границ потока. Амплитуда излучения E_0 пропорциональна оптической плотности среды, граничащей с торцом. Поэтому при нахождении волокон-

ства вводится в вертикальную стеклянную трубу 5 с внутренним диаметром $16,2 \cdot 10^{-3}$ м, по которой протекает газожидкостный поток. Излучение, рассеянное межфазными границами потока, проходит через этот же световод в обратном направлении и, отразившись от зеркал 2 и 6, через поляризационный фильтр 7 и линзу 8 направляется на фотоприемник 9. Для уменьшения фоновой засветки фотоприемника

ного датчика в газожидкостном потоке величина E_0 является функцией газосодержания потока в месте положения выходного торца световода. На рис. 2 показан характерный вид сигнала фотоприемника при «снарядном» и «пузырьковом» режимах газожидкостного потока. Процесс взаимодействия волоконно-оптического зонда с поверхностями раздела фаз при их прокалывании имеет нестационарный характер. Зона 1 соответствует положению датчика в жидкой фазе. При дальнейшем приближении лобовой части снаряда к датчику интенсивность рассеянного излучения, попадающего во входную апертуру оптического волокна, возрастает (зона 2). Пройдя через поверхность раздела, датчик оказывается в газовой фазе. При этом меняется величина E_0 (зона 3). Зона 4 соответствует прохождению датчика через донную часть снаряда, и зона 5 — датчик снова находится в жидкой фазе. С помощью порогового устройства (уровень A) и последующей электронной обработки сигнала в измерителе газосодержания 21 (см. рис. 1) производится определение длительности нахождения датчика в газовой фазе ($\Sigma\Delta t_i$) за определенный промежуток времени T , что позволяет найти газосодержание φ в месте положения датчика по формуле $\varphi = \Sigma\Delta t_i/T$.

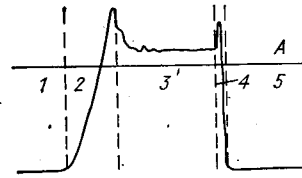


Рис. 2

На рис. 3, а показан профиль локального газосодержания в режиме газ — лифт при различных расходах газа (1 — $Q_r = 45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; 2 — $Q_r = 45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$; 3 — $Q_r = 35 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$) в трубе диаметром $16,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, полученный сканированием оптического датчика по поперечному сечению вертикального газожидкостного потока. Длина рабочего участка составляла 2,1 м. На рис. 3, б приведены результаты измерения профилей локального газосодержания φ в вертикальном газожидкостном потоке, полученные методом ЛДИС со световодом 2, 4 и методом электропроводности 1, 3, взятым для сравнения (1, 2 — $U_{10} = 0,332 \text{ м/с}$, $Q_r = 0,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 3, 4 — $U_{10} = 0,332 \text{ м/с}$, $Q_r = 0,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$). В последнем случае длина рабочего участка 6 м с внутренним диаметром трубы $15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Как правило, различие в значениях газосодержания φ , полученных этими двумя способами, не превышает 0,02. Точность измерения среднего газосодержания методом ЛДИС со световодом ограничивается точностью определения момента касания датчиком межфазной границы, выделение которого осложнено нестационарным процессом деформации поверхности раздела фаз при ее прокалывании и величиной возмущения, вводимого датчиком в измеряемый поток (внешний диаметр используемого световода $150 \cdot 10^{-6} \text{ м}$).

Измерение скорости. Методика измерения средней скорости межфазных границ отработывалась на снарядном режиме течения газожидкостного потока в вертикальной трубе. Для уменьшения газосодержания

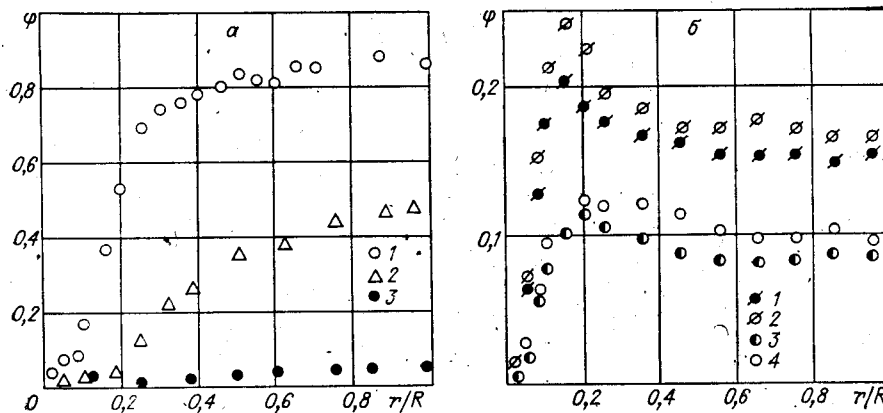


Рис. 3

в жидкостных пробках между снарядами, улучшения цикличности следования снарядов и их длины вертикальному участку трубы 5 предшествовал горизонтальный длиной 1,2 м. Специальная электронная схема 10 (см. рис. 1) позволяет измерять скорости любого вида межфазных границ таких, как лобовая и донная части газовых снарядов, пузырьки газа в жидкостных пробках между снарядами. Поскольку в данном режиме наименее подвержена флуктуациям скорость лобовой части снарядов, то из сигнала фотоприемника выделялась составляющая, соответствующая моменту взаимодействия датчика с передним фронтом снаряда (см. рис. 2, зона 2). Принцип действия схемы следующий. Полный сигнал с фотоприемника с помощью фильтров верхних 12 и нижних 11 частот разделялся на низкочастотную (НЧ) и высокочастотную (ВЧ) составляющие. Частота раздела между ними равнялась 50 кГц. Из усиленного 13 НЧ-сигнала преобразователями 14 и 15 (см. рис. 1) формировались сигналы 22, 23, которые через логическую схему И 16 запускали генератор временного интервала 17, управляющий с помощью импульса заданной длительности ключевой схемой 18. Вероятность появления сигнала 22 зависела от длительности жидкостной пробки между газовыми снарядами, причем задний фронт этого сигнала совпадал по времени с начальным участком переднего фронта низкочастотного сигнала, относящегося к лобовой части снаряда (см. рис. 2, зона 2). Передние фронты сигнала 23 и низкочастотного сигнала совпадали по времени (см. рис. 1). При срабатывании ключевая схема пропускает ВЧ-сигнал на анализатор спектра 20. Вероятность появления на выходе ключевой схемы ВЧ-сигнала, не принадлежащего лобовой части снаряда, не превышала 0,05 и зависела от концентрации пузырьков газа в жидкостных пробках. Для сравнения скорость лобовой части снаряда определялась методом двух экспозиций, основанным на фотографировании газожидкостного потока с помощью двух экспозиций с известным интервалом времени между ними. Экспозиции длительностью 1 мс осуществлялись с помощью импульсных ламп ИФК-20. Для выделения моментов непосредственного касания оптическим датчиком границы раздела фаз применялся метод электропроводности [6]. Параллельно оптическому ставился медный датчик с внешним диаметром $100 \cdot 10^{-6}$ м и прямым торцом, который находился в одной плоскости с торцом оптического датчика. С помощью координатного устройства датчики располагались на оси трубы с газожидкостным потоком.

На рис. 4 показаны основные виды НЧ-сигнала от лобовой части снаряда 1 и соответствующие им ВЧ-сигналы 2 и сигналы датчика электропроводности 3. При исследовании было выяснено, что вид сигнала зависит от угла β между осью датчика и плоскостью раздела фаз в точке касания, а также от смачиваемости рабочей жидкостью торца оптического датчика.

Сигнал первого вида (рис. 4, а) характеризуется большой длительностью переднего фронта НЧ-сигнала и большой длительностью ВЧ-сигнала. Это обуславливается тем, что зондирующее излучение лазера, рассеянное от объекта, попадает во входную апертуру световода еще до момента касания датчиком поверхности раздела фаз (угол $\beta < \beta_{кр}$, $\beta_{кр} = 7^\circ$). Причем истинной скорости соответствует зона I высокочастотного сигнала, располагающаяся до начала зоны II (см. рис. 4, а), в которой проявляется возмущающее действие оптического датчика на межфазную поверхность. Длительность возмущенной зоны зависит от скорости снаряда и геометрических размеров датчика. После момента касания световодом межфазной границы, определенной по сигналу датчика электропроводности (точка А, рис. 4, а), происходит значительное уменьшение частоты доплеровского сигнала до $(0,1-0,3) f_D$, что объясняется торможением межфазной границы вследствие ее деформации при процессе накалывания. В нашем случае вероятность появления НЧ- и ВЧ-сигналов подобного вида составляла 10% от общего количества сигналов, пропускаемых электронной схемой.

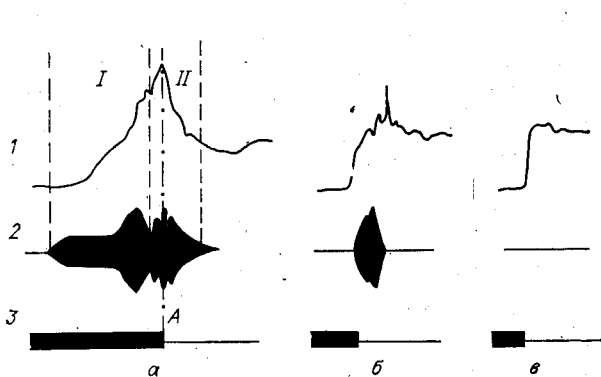


Рис. 4

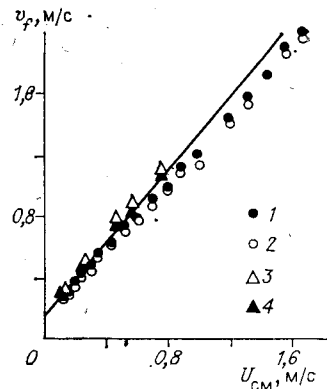


Рис. 5

Сигналы, приведенные на рис. 4, б, в, характеризуются крутым передним фронтом и по сравнению с сигналами первого вида малой длительностью или отсутствием высокочастотного сигнала. При этом наблюдается несоответствие доплеровской частоты ВЧ-сигналов истинной скорости межфазной границы газожидкостного потока. Объясняется это тем, что угол $\beta > \beta_{кр}$ и зондирующее излучение попадает во входную апертуру оптического волокна только при деформации межфазной границы в процессе накалывания.

На рис. 5 приведены результаты измерения скорости переднего фронта газовых снарядов, полученные методом ЛДИС со световодом при выделении из полного ВЧ-спектра сигналов наибольшей длительности 2, 4, и результаты, найденные одновременно методом двух экспозиций 1, 3. Данные 1, 2 получены в газожидкостном потоке состава вода — воздух, а данные 3, 4 — в газожидкостном потоке состава глицерин — вода — воздух (характеристики водоглицериновой смеси: $\rho = 1,14 \text{ г/см}^3$, $n = 1,40$, $\nu = 5,92 \text{ мм}^2/\text{с}$). Различие значений скорости, полученных двумя методами, не превышает 5%. Расхождение с кривой, построенной по формуле Тейлора — Никлина [7], при увеличении расхода газа объясняется значительным повышением газосодержания в жидкостных пробах.

Таким образом, приведенные выше результаты свидетельствуют об удовлетворительной точности ЛДИС со световодом и его эффективности при исследовании локальных гидродинамических характеристик газожидкостных потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tanaka T., Benedek G. B. Measurement of the velocity of blood flow (in vivo) using a fiber optic catheter and optical mixing spectroscopy // Appl. Opt.—1975.— V. 14, N 1.
2. Nishihara H., Koyama J., Hoki N., Kajiya F., Hironaga M., Kano M. Optical — fiber laser Doppler velocimeter for high-resolution measurement of pulsatile blood flows // Appl. Opt.—1982.— V. 21, N 10.
3. Kazuo K., Shuichi T., Koichi H., Masahiro N. Laser Doppler velocimeter with a novel optical fiber probe // Appl. Opt.—1981.— V. 20, N 14.
4. Лисицын В. Н., Орлов В. А., Фокин Ю. Н., Чеботаев В. П. Лазерный доплеровский измеритель скорости непрозрачных потоков жидкости и частиц // Труды III Всесоюз. сов. «Экспериментальные методы и аппаратура по исследованию турбулентности». — Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1980.
5. Евсеев А. Р. Лазерный доплеровский измеритель скорости со световодом // Автометрия.—1982.— № 3.
6. Neal L. C., Bankoff S. G. A high-resolution resistivity probe for determination of local void profiles in gas-liquid flow // AIChEJ.—1963.— V. 9, N 4.
7. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения.— М.: Мир, 1972.

Поступила в редакцию 17 октября 1985 г.