

## ЛИТЕРАТУРА

1. У. Шерклифф. Поляризованный свет, М., «Мир», 1965.
2. С. С. Кузнецкий, М. К. Чмых, С. Б. Шестак, В. В. Кравченко, А. Е. Тетерин, А. М. Фиштейн. Фазометрическая приставка повышенной точности к цифровым частотомерам.— Труды III краевой научно-технической конференции. Красноярск, 1972.

Поступила в редакцию 5 сентября 1973 г.

УДК 532.517.681.121.8

**Ю. Г. ВАСИЛЕНКО, Ю. Н. ДУБНИЩЕВ,  
В. С. СОБОЛЕВ, Е. Н. УТКИН**  
(Новосибирск)

### ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ДОППЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПОТОКА

Целью настоящего сообщения является иллюстрация возможности применения лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) [1—4] для исследования пограничного слоя. Оптическая часть измерительной установки представлена на рис. 1. Линейно-поляризованный луч лазера 1, работающего в режиме основной моды, после прохождения телескопической трубки (линзы 2 и 3) поступает на расщепитель 4, где делится по волновому фронту на два одинаковых пучка. Расщепленные пучки проходят через четвертьволновые фазовые пластинки 5, 6, превращаясь соответственно в право- и левоциркулярно-поляризованные пучки, ограничиваемые одинаковыми прямоугольными щелями 7, 8 и фокусируются объективом 9 в исследуемую область потока. Свет, дифрагированный на частицах, движущихся в потоке, ограничивается апертурной диафрагмой 10 и направляется микроскопом 11, 12 через полевую диафрагму 13 на поляризационную призму 14, где расщепляется на два ортогонально-поляризованных луча одинаковой интенсивности, плоскости поляризации которых совпадают с плоскостями поляризации ортогональных компонент на выходе фазовых пластинок. Каждый из расщепленных призмой пучков направляется на соответствующий фотоприемник 15, 16, сигналы с которых поступают на дифферен-

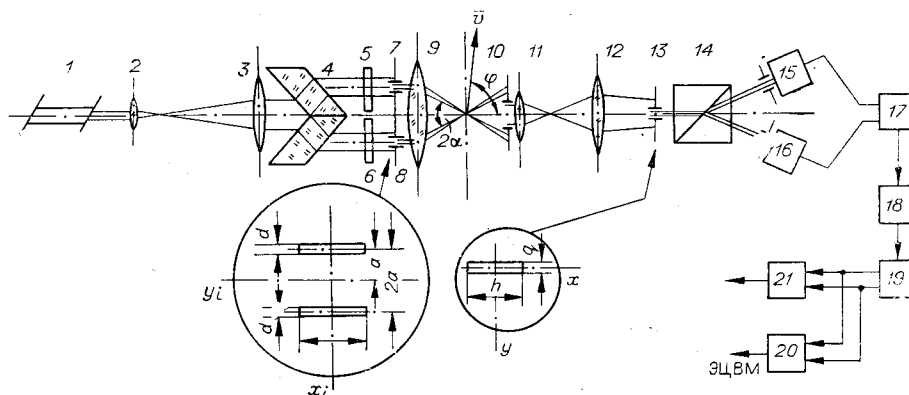


Рис. 1.

циальный усилитель 17. Электрический сигнал на выходе каждого из двух фотоприемников описывается соответствующим выражением [5].

$$I_1(t) = \sum_{n=1}^N I_{pn}(t-t_n) + I_{dn} \cos \omega_d(t-t_n); \quad (1)$$

$$I_2(t) = \sum_{n=1}^N I_{pn}(t-t_n) - I_{dn} \cos \omega_d(t-t_n),$$

где  $I_{pn}(t-t_n)$  — так называемая «постоянная» составляющая, всегда появляющаяся при гетеродинном приеме световых сигналов;  $I_{dn}(t-t_n)$  — амплитуда доплеровской составляющей сигнала;  $t_n$  — момент вхождения  $n$ -й рассеивающей частицы в пробный объем, по которому осредняется скорость потока;  $N$  — число частиц, прошедших через пробный объем за время реализации сигнала;  $\omega_d$  — круговая доплеровская частота, линейно-связанная со скоростью следующим соотношением:

$$\omega_d = \frac{4\pi v \sin \alpha \sin \varphi}{\lambda}. \quad (2)$$

Здесь  $v$  — скорость потока в пробном объеме;  $\lambda$  — длина волны излучения лазера;  $\alpha$  и  $\varphi$  — углы (см. рис. 1).

Частотный спектр «постоянной» составляющей определяется нестабильностью мощности лазерного излучения, модуляцией интенсивности пучка подвижными неоднородностями среды, а также градиентом скорости потока в пределах пробного объема. Наличие «постоянной» составляющей затрудняет последующую обработку сигнала. Схема позволяет существенно снизить уровень «постоянной» составляющей и шумов. Как следует из (1), аддитивные составляющие сигнала на выходе каждого фотоприемника синфазны, тогда как доплеровские составляющие противофазны. В результирующем сигнале на выходе дифференциального усилителя низкочастотные составляющие компенсируются:

$$I(t) = I_1(t) - I_2(t) = 2 \sum_{n=1}^N I_{dn}(t-t_n) \cos \omega_d(t-t_n). \quad (3)$$

На практике полная компенсация не достигается из-за деполаризующих свойств рассеивающих частиц.

Как показано в [6],

$$I_{dn}(t) = \alpha E^2 \frac{d^2 l^2 b_n^2}{\lambda^2 F^2 M^2} p(y) p(x) \operatorname{sinc}^2 \left( \frac{kly}{2\pi FM} \right) \operatorname{sinc}^2 \left[ \frac{kd}{2\pi FM} v(t-t_n) \right] \times \\ \times \operatorname{sinc}^2 \left( \frac{kab_n}{2\pi F} \right), \quad (4)$$

где

$$p(y) = \begin{cases} 1 & \text{при } -\frac{q}{2} < y < \frac{q}{2} \\ 0 & \text{при } y \leq -\frac{q}{2}, y \geq \frac{q}{2}; \end{cases}$$

$$p(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } -h/2 < x < h/2; \\ 0 & \text{при } x \leq -h/2, x \geq h/2; \end{cases}$$

$h, q$  — размеры полевой диафрагмы перед призмой;  $d, l$  — размеры щели расщепителя лазерного пучка;  $a$  — расстояние между щелями;  $b_n$  — размер  $n$ -й рассеивающей частицы в пробном объеме;  $M$  — увеличение микроскопа;  $\alpha$  — чувствительность фотоприемника;  $F$  — фокусное расстояние фокусирующего объектива;  $k$  — волновое число.

Выражение (4) допускает простую физическую интерпретацию. Свет, дифрагированный на щелях, интерферирует в фокальной плоско-

сти объектива 9. Ширина интерференционной полосы  $\gamma = \lambda F / 2a$ . Рассеивающая частица, которую можно представить в виде экрана размером  $b_n$ , параллельного оси  $y_i$ , пересекает поле интерференции со скоростью  $v$  в направлении оси  $x_i$ . Микроскоп формирует в плоскости фотоприемника модулированное по интенсивности изображение движущейся частицы в рассеянном свете. Частота модуляции оказывается равной доплеровской частоте. Размер поля интерференции, или, что то же самое, размер пробного объема в плоскости  $x_i y_i$ , определяется интервалом между первыми нулями функции  $\text{sinc}^2(kdx_i/2\pi F)$ , а по оси  $y_i$  — функции  $\text{sinc}^2(kly_i/2\pi F)$ , т. е.  $\delta x_i = \lambda F / d$ ,  $\delta y_i = \lambda F / l$  соответственно. Здесь  $x_i = x/M = v(t - t_n)$ ,  $y_i = y/M$ . Размеры пробного объема можно варьировать не только параметрами фокусирующей части оптической схемы  $d$ ,  $F$ , но и изменением размеров  $q$ ,  $h$  полевой диафрагмы 13. Уменьшением  $q$ ,  $h$  ограничивается изображение пробного объема на светочувствительной поверхности фотоприемника и, следовательно, улучшается пространственное разрешение системы. Однако при этом уменьшается число периодов высокочастотного заполнения радиоимпульса доплеровского сигнала от одиночной частицы и изменяется огибающая. Следствием является ухудшение точности измерения пульсаций скорости и при постоянном времени осреднения средней скорости. Поэтому повышать пространственное разрешение системы путем ограничения размера изображения пробного объема следует в пределах, обеспечивающих необходимую точность измерения скорости.

Выбор пространственного разрешения измерительной системы при исследовании скорости потока в пограничном слое на пластинке имеет свои особенности. Как видно из рис. 2, а, подойти близко к поверхности пластины невозможно из-за конечного угла дифракции сфокусированного пучка  $\beta \approx d/F$ . Минимальное расстояние  $\Delta$ , на которое можно приблизиться к плоской стенке, определяется из очевидных геометрических построений:

$$\Delta \approx \frac{1}{2} \frac{l}{F} \left( q - \frac{\lambda F^2}{l^2} \right). \quad (5)$$

Из (5) следует, что уменьшить  $\Delta$  можно только за счет ухудшения пространственного разрешения. Если перейти от плоской стенки к выпуклой с большим радиусом кривизны (рис. 2, б), то, выбирая  $R$  согласно выражению

$$R = \frac{F^2}{l^2} \left( 2\Delta + \frac{\lambda F}{l} \right), \quad (6)$$

можно как угодно близко подойти к стенке без потери в пространственном разрешении.

Электронно-измерительная часть ЛДИС содержит (см. рис. 1) дифференциальный усилитель 17, блок автоматической фильтрации 18,

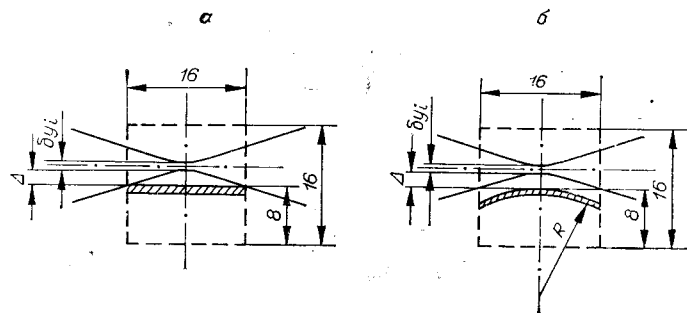


Рис. 2.

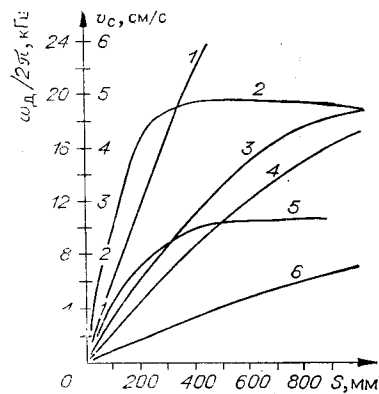


Рис. 3.

устройство логической обработки сигнала 19, цифровой счетчик импульсов с предварительным выбором времени счета 20 и частотный детектор 21. С выхода дифференциального усилителя сигнал поступает на блок автоматической фильтрации 18, который обеспечивает автоматическое слежение за доплеровской частотой и устраняет шумовые составляющие. Устройство логической обработки вырабатывает из входных радиоимпульсов пачки сигнальных импульсов и соответствующие им строб-импульсы. Цифровой счетчик выдает в цифровом виде значения, равные или кратные скорости потока, осредненной за заданное время. Счетчик

имеет также выход в виде кода, который можно подавать в ЭЦВМ. Пачки сигнальных импульсов и строб-импульсы поступают также на частотный детектор, на выходе которого получается аналоговый сигнал, пропорциональный «мгновенной» скорости потока. Блок электронной обработки является универсальным и может использоваться с различными оптическими схемами ЛДИС для исследования как стационарных, так и нестационарных потоков.

**Экспериментальные результаты.** Исследовался профиль скорости пограничного слоя над пластиной, установленной в гидродинамическом канале сечением  $16 \times 16$  мм (см. рис. 2, б). Толщина пластины 0,3 мм, радиус кривизны  $R=9,8$  мм. Параметры оптической схемы:  $F=140$  мм;  $d=1,6$  мм;  $l=9$  мм;  $a=8$  мм;  $M=80$ ;  $q=0,8$  мм;  $h=4,8$  мм.

Полевая диафрагма 13 вырезает 20 интерференционных полос, что соответствует 20 периодам высокочастотного заполнения радиоимпульса доплеровского сигнала от единичной частицы. Измерения проводились в водном потоке, в который вводились рассеивающие частицы в виде фторопластовой суспензии. Размер рассеивающих частиц 5–10 мкм. Пространственное разрешение системы составляет  $\delta x_i=60$  мкм,  $\delta y_i=10$  мкм,  $\delta z_i=600$  мкм. На рис. 3 представлено семейство профилей скорости в пограничном слое на пластине при расстояниях от края  $s$  1, 6 и 11 мм, снятых при средних скоростях, равных  $v_c$ , 2,5, 5 и 10 см/с ( $1-v_c=10$  см/с,  $s=11$  мм;  $2-v_c=5$  см/с,  $s=1$  мм;  $3-v_c=5$  см/с,  $s=6$  мм;  $4-v_c=5$  см/с,  $s=11$  мм;  $5-v_c=2,5$  см/с,  $s=1$  мм;  $6-v_c=2,5$  см/с,  $s=11$  мм). Хорошо видно развитие пограничного слоя вдоль пластины. Минимальное расстояние  $\Delta$ , на которое удалось подойти к пластине, составляет 20 мкм. Время усреднения 10 с. На рис. 3 по оси абсцисс отложено расстояние от стенки  $\Delta$  в микронах.

Эксперименты показали перспективность применения лазерного доплеровского измерителя скорости в гидродинамических исследованиях подобного рода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. I. Goldstein, D. K. Kreid. Measurement of Laminar Flow Development in a square duct using a Laser-Doppler Flowmeter.—Trans. ASME. ser. E, I. Appl. Mech., 1967, v. 34, № 4.
2. Б. С. Ринкевичюс. Применение ОКГ для определения скорости частиц в двухфазной струе методом гетеродинамирования.—Радиотехника и электроника, 1969, т. 14, № 10.
3. Ю. Н. Дубнищев, В. П. Коронкевич, В. С. Соболев, А. А. Столповский, Е. Н. Уткин, Н. Ф. Шмойлов. Измерение параметров турбулентных потоков с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости.—Автоматия, 1971, № 1.

4. А. Н. Домарацкий, Ю. Н. Дубнишев, В. П. Коронкевич, В. С. Соболев, А. А. Столповский, Е. Н. Уткин, Н. Ф. Шмойлов. Сравнение показаний лазерного доплеровского измерителя скорости и термоанемометра в следе за цилиндром.— ПМТФ, 1972, № 1.
5. Ю. Г. Василенко, Ю. Н. Дубнишев. Уменьшение уровня постоянной составляющей и шумов в выходном сигнале лазерного доплеровского измерителя скорости.— Автометрия, 1972, № 6.
6. Yu. G. Vasilenko, Yu. N. Dubnitshev, V. P. Koronkevitch, V. S. Sobolev. Laser Velocity Meters — a Comparative Study.— Optics and Laser Technology, 1972, v. 4, № 6.

Поступила в редакцию 10 января 1973 г.

УДК 621.375.826

Ю. В. ТРОИЦКИЙ

(Новосибирск)

### РАСЧЕТ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА В ПЛЕНОЧНОМ МОДОВОМ СЕЛЕКТОРЕ ОДНОЧАСТОТНОГО ОКГ

Использование тонкой поглощающей металлической пленки в резонаторе ОКГ является эффективным средством получения одночастотной генерации [1]. Однако этот метод не может применяться в лазерах большой мощности, так как вследствие нагрева пленки излучением стабильность оптического резонатора может ухудшиться; если же выделение тепла очень велико, то характеристики селектора могут деградировать вплоть до выхода из строя.

Селектор, в частности, может нагреваться спонтанным излучением активной среды; эта доля поглощенной энергии, по-видимому, может быть снижена до безопасного уровня путем экранирования нерабочей части пленки. Вторым источником нагрева является поле стимулированного излучения внутри резонатора. Влияние этого фактора в значительной степени определяется режимом использования поглощающей пленки. Цель настоящей работы — рассчитать количество тепла, выделяемого в пленке, и найти возможность его уменьшения.

Мощность  $P_{пл}$ , выделяющаяся в пленке, зависит от ее положения вдоль оси резонатора и минимальна, когда пленка находится в узле электрического поля стоячей волны. Эта мощность равна

$$P_{пл} = P_{рез} \left[ a_{пл} + F \left( \frac{2\pi \Delta L_2}{\lambda} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

Здесь  $P_{рез}$  — мощность бегущей волны, падающей на пленку со стороны активной среды;  $F$  — фактор резкости, определяющий скорость нарастания потерь по мере выхода пленки из узла [2];  $\lambda$  — длина волны;  $\Delta L_2$  — расстояние пленки до узла электрического поля;  $a_{пл}$  — потери в пленке в расчете на два прохода в тот момент, когда пленка находится в узле (например, потери, связанные с конечной толщиной металлического слоя). Считаем, что частота генерации не изменяется при выходе пленки из узла, что справедливо, если  $l_2 \ll L$ , где  $l_2$  — расстояние от пленки до ближайшего зеркала,  $L$  — полная длина резонатора; если это условие не выполнено, то величину  $F$  необходимо, согласно [3], замещать на  $F \left[ \frac{n_2 L}{n_2 L + (n_1 - n_2) l_2} \right]^2$ . Величина  $F$  определяется параметрами поглощающей пленки [3].