

акустической энергии, так и учет отклонений закона расхождения фронта волны, отличного от сферического, т. е. учет условий, существующих в реальной обстановке.

Проведенная обработка результатов наблюдений показала также реальность предсказания достижений максимума аппроксимированной функции (экстраполяция), а при наличии сведений об одном из параметров ( $v$ ,  $b_0^2$  или  $d$ ) остальные параметры легко вычисляются.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Конторов А. С., Голубев-Новожилов Ю. С. Введение в радиолокационную системотехнику. М., «Сов. радио», 1971.
2. Авербух Г. Ю., Розов Ю. Л., Челпанов И. Б. О погрешности измерения максимальных значений стационарного случайного процесса дискретными методами.— «Автометрия», 1973, № 2, с. 35—43.
3. Калмыков И. В., Куклин Г. Н., Резник А. Л. Аналитический способ приближения функций.— «Автометрия», 1975, № 2, с. 69—73.
4. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики. М., «Наука», 1965.

*Поступила в редакцию 28 июня 1976 г.;  
окончательный вариант — 18 октября 1976 г.*

УДК 532.57 : 621.373.3

**В. Я. БУТОВ, А. И. ПОВРОЗИН**

(Харьков)

### **ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВОДНЫХ ПОТОКОВ В ШИРОКИХ ЛОТКАХ С ПОМОЩЬЮ ЛДИС**

Совсем недавно лазерные доплеровские измерители скорости (ЛДИС) находили применение для исследования характеристик водных потоков в каналах с небольшими поперечными размерами (обычно не превышающими несколько сантиметров) [1—5].

Однако в настоящее время в связи с совершенствованием измерительной техники и методов измерений ЛДИС все чаще применяют для измерений в лотках шириной в десятки сантиметров, как, например, в [6, 7]. В связи с этим представляет интерес выяснение границ применимости ЛДИС для измерения характеристик потоков в широких лотках, особенно при использовании стандартной регистрирующей аппаратуры и наиболее широко применяющихся на практике гелий-неоновых ОКГ.

В качестве стандартной регистрирующей аппаратуры при измерении средних скоростей потоков обычно применяют анализаторы спектров (в экспериментах был использован С4-12). А из гелий-неоновых ОКГ наиболее часто применяют ЛГ-36, мощность излучения которого на длине волны 0,63 мкм в одномодовом режиме составляет 20 мВт (по паспортным данным).

Определялось отношение сигнал/шум в зависимости от скорости потока для различной ширины экспериментального лотка. Измерения проводились аналогично работе [8]. На рис. 1 показана схема экспериментальной установки ЛДИС. В качестве оптической схемы использована дифференциальная схема. Ее выбор основан на преимуществах перед другими схемами: простоте настройки и юстировки, возможно-

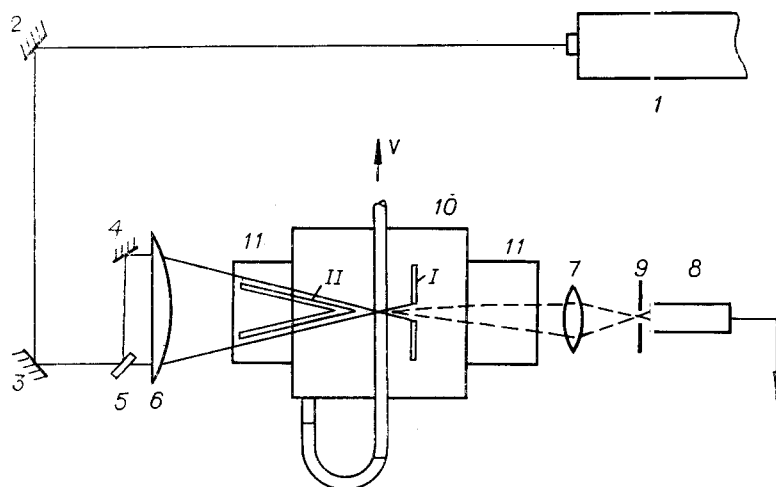


Рис. 1.

сти обеспечения достаточно высокого уровня сигнала на входе и отношения сигнал/шум на выходе фотоприемника.

В представленной схеме излучение от ОКГ 1, отражаясь от вспомогательных зеркал 2 и 3, попадало на расщепитель, состоящий из полупрозрачной пластинки 5 и зеркала 4. Линзой 6 (с фокусным расстоянием 45 см) параллельные пучки после расщепителя фокусировались в измеряемой точке потока. Рассеянное излучение собиралось линзой 7 (с фокусным расстоянием 14 см) и направлялось на фотокатод фотоприемника 8. Диафрагма 9 диаметром 120 мкм устанавливалась для увеличения отношения сигнал/шум. Оптимальная величина отверстия диафрагмы подбиралась опытным путем. Для уменьшения фоновой засветки между катодом фотоприемника 8 и диафрагмой 9 устанавливался интерференционный фильтр с коэффициентом пропускания 73% на длине волны 0,63 мкм. В качестве фотоприемника использовался ФЭУ-79.

Измерения скорости производились в стеклянной трубке диаметром 12 мм, установленной горизонтально в прозрачном баке 10. Бак 10 (размерами 250×250×350 мм) использовался как емкость, создающая напор в трубке, и в то же время имитировал лоток, ширину которого можно было менять в пределах от 40 до 820 мм с помощью специальных насадок 11. Из бака жидкость через гибкий переходник поступала в стеклянную трубку. Скорость потока жидкости в трубке регулировалась путем изменения проходного сечения гибкого переходника. Такая система позволяла создавать скорости потока от 0 до 40 см/с (верхняя граница скорости потока соответствует максимальному проходному сечению гибкого переходника).

Оптическая схема собиралась на массивном металлическом основании с целью максимального ослабления возможного воздействия на ЛДИС внешних вибраций. При работе с дифференциальной схемой угол пересечения падающих в поток лучей выбирался из соображений увеличения интенсивности рассеянного излучения и был равен 9°.

Так как гидравлическая система содержала затолченную трубку, то предусматривались специальные меры по устранению загрязнений и различного рода неоднородностей на поверхности стеклянной трубки в месте падения лучей. Рассеяние на неподвижных неоднородностях приводило к значительному уменьшению отношения сигнал/шум на выходе фотоприемника и к возникновению ложных сигналов (так как это рас-

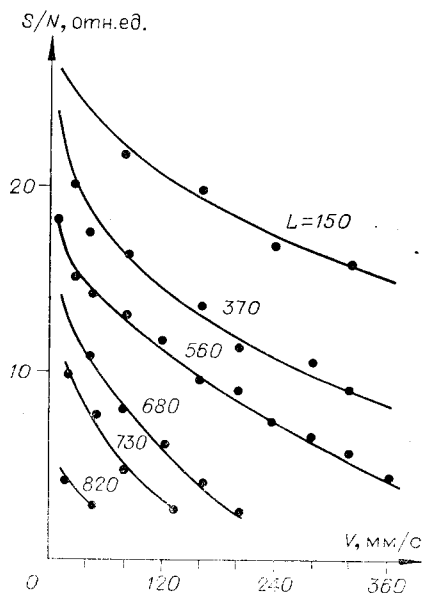


Рис. 2.

Падение отношения сигнал/шум с увеличением ширины лотка может быть обусловлено двумя основными причинами: мощностью фонового излучения и уменьшением уровня сигнала вследствие затухания мощности излучения ОКГ в потоке при увеличении ширины лотка. Изложенное выше вытекает из выражения для отношения сигнал/шум  $S/N$ , которое в общем виде может быть представлено следующей зависимостью [9]:

$$S/N = CP_1P_2/[2e\Delta F_\phi(P_1+P_2+P_\phi+i_t/C)], \quad (1)$$

где  $C$  — постоянная фотоприемника;  $P_1$  и  $P_2$  — мощности сигнальных лучей в схеме гетеродинамирования;  $e$  — заряд электрона;  $\Delta F$  — ширина полосы пропускания фильтра на выходе фотоприемника;  $P_\phi$  — мощность фонового излучения;  $i_t$  — темновой ток фотоприемника. Выражение (1) справедливо для случая, когда уровень дробовых шумов значительно превосходит по величине уровень тепловых шумов, что имеет место на практике.

Мощностью фонового излучения обычно пренебрегают, так как выполняется условие  $P_1 \approx P_2 \gg P_\phi$ . Однако для широких лотков это положение требует проверки. Действительно, в широком лотке путь прохождения луча в воде значительный, а следовательно, и большое число частиц на его пути принимает участие в рассеянии света. Учитывая, что угол падения лучей невелик, суммарная интенсивность рассеянного света в направлении фотоприемника может оказаться значительной.

Вклад в фоновое излучение может быть существенным и за счет вторичного рассеяния на частицах по всей ширине лотка в пределах поля зрения фотоприемника. В связи с этим было проверено возможное влияние указанного фонового излучения на величину отношения  $S/N$ . Проверка основывалась на сравнении значений  $S/N$  для случаев, когда принимались меры по устранению указанного выше фонового излучения и когда такие меры не предпринимались при прочих равных условиях.

Устранение фона осуществлялось с помощью экранов следующим образом. В лотке шириной 680 мм в местах, показанных на рис. 1 пунк-

сеяние фактически являлось опорным излучением в схеме гетеродинамирования).

Нижний предел диапазона скоростей потока для данной схемы был равен 0,4 мм/с (он определялся геометрией оптической схемы и инструментальной погрешностью ЛДИС).

Оптимальная концентрация частиц в воде подбиралась экспериментальным путем и составляла примерно  $1/5 \cdot 10^4$ .

На рис. 2 представлены зависимости отношений сигнал/шум от скорости потока для различных поперечных размеров лотка  $L$ . Из рисунка видно, что для данной ширины лотка, отношение сигнал/шум падает с увеличением скорости потока. Кроме того, оно падает также с увеличением ширины лотка, т. е. с увеличением пути, проходимого излучением в воде с заданной концентрацией частиц.

тирными линиями, размещались экраны. Экран I имел отверстие и юстировался в оптической схеме таким образом, чтобы после его установки поле зрения фотоприемника оставалось неизменным. Экран II представлял собой две непрозрачные плоскости, установленные V-образно. Проверка показала, что установка экранов не оказывает влияния на величину отношения сигнал/шум.

Учитывая также, что в эксперименте был использован ФЭУ с малым уровнем темнового тока (ФЭУ-79), т. е.  $P_1 \gg I_{\tau}/C$ , и выполнялось равенство  $P_1 = P_2$ , можно значительно упростить выражение (1), после чего оно приобретает вид

$$S/N = CP/(e\Delta F_{\phi}), \quad (2)$$

где  $P = P_1 = P_2$ . Из выражения (2) ясно, что при увеличении ширины лотка (добавлении на пути луча среды с коэффициентом пропускания  $\tau$ ) отношение сигнал/шум

$$S/N = C\tau^2 P/(e\Delta F), \quad (3)$$

т. е. уменьшается в  $\tau^2$  раз (где  $\tau < 1$ ).

Таким образом, снижение отношения  $S/N$  в широких лотках (по крайней мере, шириной до 1000 мм) обусловлено уменьшением интенсивности излучения ОКГ. Ясно, что увеличение мощности излучения ОКГ может привести к увеличению отношения сигнал/шум при постоянном пропускании  $\tau$  или к компенсации потерь при уменьшении  $\tau$  с увеличением ширины лотка.

В данных экспериментах за счет дополнительных потерь на вспомогательных зеркалах 2 и 3 (см. рис. 1) мощности лучей, падающих на фокусирующую линзу, составляли по 5 мВт. Можно ожидать, что при вводе лучей без этих зеркал (что было трудно осуществить в условиях проводимого эксперимента) с помощью ЛГ-36 можно будет проводить измерения в лотках шириной до 1000 мм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. Н. Уменьшение уровня «постоянной» составляющей и шумов в выходном сигнале лазерного доплеровского измерителя скорости.— «Автоматика», 1972, № 5, с. 51—58.
2. Vonk P. I., DRAIN L. E., Moss B. C. Measurement of spatial and temporal correlations of turbulence in water by laser anemometry.— «DISA Information», 1971, № 12, p. 17—20.
3. Дубнищев Ю. Н., Коронкевич В. П., Соболев Е. С., Столповский А. А., Уткин Е. Н., Шмойлов Н. Ф. Измерение параметров турбулентных потоков с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости.— «Автоматика», 1971, № 1, с. 36—42.
4. Joldstein R. I., Hagen W. F. Turbulent flow measurements utilizing the Doppler shift of scattered laser radiation.— «Phys. Fluids», 1967, vol. 10, № 6, p. 1349—1352.
5. Chung I. S., Graebel W. P. Laser anemometer measurements of turbulence in non-newtonian pipe flows.— «Phys. Fluids», 1972, vol. 15, № 4, p. 546—554.
6. Васильцов Э. А., Докучаев Ю. Н., Шихорин В. М. Лазерный доплеровский измеритель скорости и особенности его использования при исследовании перемешивающих устройств.— «Научные приборы», М., Изд. ВИНИТА, 1974, № 3 (17), с. 29—36.
7. Bates C. I. Experimental pipe flow analysis using a laser Doppler anemometer.— «DISA Information», 1974, № 6, p. 5—10.
8. Ринкевичюс Б. С., Смирнов В. И., Чернов В. Ф. Измерение параметров турбулентных потоков жидкости по эффекту Доплера.— «Труды МЭИ. Физика». Вып. 144. М., 1972, с. 57—64.
9. П р а т т В. К. Лазерные системы связи. М., «Связь», 1972.

Поступила в редакцию 21 апреля 1975 г.;  
окончательный вариант — 30 декабря 1975 г.