

С.Д. Бураков, А.П. Годлевский, С.А. Останин

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЯ АВТОДИННЫМ ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКОМ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА

Приводятся результаты экспериментальных исследований дистанционного лазерного автодинного доплеровского анемометра на YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазере непрерывного действия. Показана возможность определения таких параметров аэрозольных частиц, как скорость, ускорение, размер, сечение рассеяния, концентрация.

Одним из эффективных средств определения динамических характеристик газовых и жидкостных потоков служит измерение скорости взвешенных в этих потоках частиц или аэрозолей. Скорость легких частиц более соответствует скорости потока, чем скорость тяжелых частиц. Отставание частиц составляет не свыше 0,01% [1] при размерах не более 0,3 мкм вплоть до частот пульсаций скорости потока 3 кГц. Однако для частиц аэрозоля таких размеров существует проблема регистрации рассеянного сигнала от отдельной частицы. Применяемые для этой цели лазерные доплеровские анемометры обеспечивают только локальные измерения, требуют использования сложных высокоточных оптических систем, имеют низкую оптическую помехозащищенность.

В последнее время для регистрации слабого отраженного или рассеянного лазерного излучения широко используется метод автодинного приема [2, 3], использующий высокую динамическую чувствительность к возвращенному в резонатор эхо-сигналу. В работах [4, 5] сообщалось о достигнутой высокой пороговой чувствительности к рассеиваемому излучению CO<sub>2</sub>-лазера, а в [6] аналогичные исследования были проведены с YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазером, при этом получена рекордная чувствительность к величине регистрируемого эхо-сигнала в результате использования лазера с параметрами шума, близкими к естественным.

В работе [7] приводятся результаты исследования когерентного анемометра на CO<sub>2</sub>-лазере. Скорость определялась по спектру доплеровских сигналов от коллектива частиц, поэтому не ставилась задача анализа характера движения отдельных частиц. Невозможность одновременного измерения доплеровской частоты и размера рассеивающей частицы делает неверной оценку скорости в турбулентных потоках при рассеянии излучения на крупных частицах.

В настоящей работе приводятся результаты исследования лазерного автодинного доплеровского анемометра (АДА) для определения скорости отдельных частиц аэрозоля. Приводятся измерения ускорения, сечения рассеяния, размеров и концентраций частиц.

При низких по сравнению с частотой релаксационных колебаний приемопередающего лазера частотах биений, реализуемых в случае малой скорости исследуемого объекта для CO<sub>2</sub>-лазера, излучение лазера будет промодулировано на частоте биений [8]. Амплитуда модуляции при этом составит  $i_m = I_0 \beta g (g - 1)$ , где  $I_0$  — стационарная плотность фотонов в резонаторе,  $\beta$  — коэффициент воздействия эхо-сигнала [8],  $g$  — превышение мощности накачки над ее пороговым значением.

Рассмотрим случай, возникающий при зондировании в видимом и ближнем ИК-диапазоне длин волн автодинным приемопередатчиком на основе твердотельного лазера. В этом случае для доплеровского сдвига практически при любых скоростях исследуемого объекта справедливо  $\omega_m > \omega_p$ ,  $\omega_p$  — частота релаксационных колебаний приемопередающего лазера. В работе [8] показано, что при малом внешнем импульсном воздействии, таком что  $I(t) = I_0 + i(t)$ ,  $i(t) \ll I_0$ , и частота доплеровского сдвига  $\omega_m$ , решая систему самосогласованных балансных уравнений для инверсии населенности и числа фотонов в резонаторе в приближении малых амплитуд, получим следующее уравнение для переменной составляющей:

$$i(t) = -i_m [\cos(\omega_m t + \varphi) - e^{1/2 g \tau^{-1}} \cos(\omega' t + \varphi)],$$

$$\text{tg } \varphi = \omega_m g \tau^{-1} / (\omega_m^2 - \omega_p^2), \quad \omega' = [\omega_p^2 - (g \tau^{-1})^2 / 4]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\tau$  — время релаксации лазерного уровня;  $\varphi$  — фаза излучения;

$$i_m = \frac{J_0 Q_0 \beta v \sqrt{\omega_m^2 + (g \tau^{-1})^2}}{\sqrt{(\omega_m^2 - \omega_p^2) + (\omega_m g \tau^{-1})^2}};$$

$Q_0$  — добротность резонатора;  $v$  — скорость света в активной среде.

Из (1) видно, что при небольших уровнях накачки  $\omega' \approx \omega_p$ . Следовательно, при импульсном характере воздействия эхо-сигнала, что справедливо в случае приема сигнала от отдельных частиц аэрозоля, пролетающих через фокальную область приемопередающей системы, модуляция излучения лазера происходит на двух частотах  $\omega_m$  и  $\omega_p$ . При  $\omega_m \gg \omega_p$ , исходя из вышеизложенного, легко получить  $i_m = I_0 Q_0 \beta v / \sqrt{1 + (g\tau^{-1})^2}$ , откуда видно, что реакция интенсивности генерации лазера линейно зависит от воздействия эхо-сигнала  $\beta$ .

Поскольку при относительно малых скоростях ( $v/c \ll 1$ ) решающую роль играет продольный эффект Доплера, то возможно измерение компоненты вектора скорости, параллельной оптической оси зондирования.

Кроме скорости возможно измерение сечения рассеяния и размеров частиц. В случае рассеяния излучения отдельной частицей дифференциальное сечение рассеяния связано с интенсивностью переменной составляющей линейно:

$$I_m(t) = I_0(t) d\sigma R^{-2} d\Omega^{-1},$$

где  $\Omega$  — элементарный телесный угол;  $R$  — расстояние до рассеивающей частицы;  $I_0(t)$  — амплитуда переменной составляющей доплеровского сигнала при зеркальном отражении излучения строго обратно. Это позволяет определять  $d\sigma$  из измерения амплитуды переменной составляющей доплеровского сигнала. При рассеянии излучения на малых частицах связь размера частицы с дифференциальным сечением рассеяния имеет вид [1]

$$d\sigma = \frac{r^6}{\kappa^2} \left( \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 d\Omega,$$

где  $\kappa$  — волновое число,  $n$  — показатель преломления воды. Из этого соотношения определяется размер частицы. По измерениям интервалов времени  $\Delta t$  между двумя доплеровскими сигналами можно сделать оценку концентрации частиц:  $n = (\Delta t v)^{-3}$  при усреднении по большому числу реализаций.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

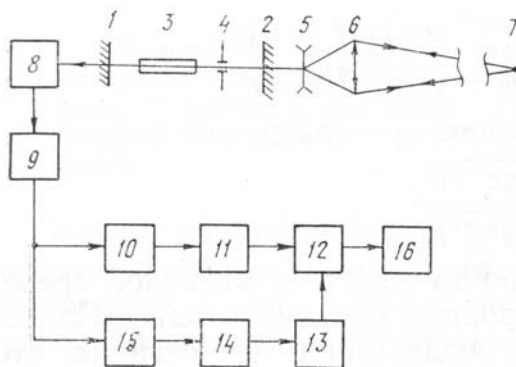


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1, 2 — зеркала резонатора; 3 — YAG:Nd<sup>3+</sup>-кристалл; 4 — диафрагма; 5, 6 — телескоп Галилея; 7 — область фокусировки; 8 — фотоприемник; 9 — предусилитель; 10 — фильтр высоких частот; 11 — режекторный фильтр; 12 — АЦП; 13 — генератор тактовых импульсов; 14 — триггер; 15 — амплитудный детектор; 16 — вычислительный комплекс «MERA-660»

Резонатор лазера образован зеркалами 1 и 2 с коэффициентами отражения соответственно 99,98 и 60%. Кристалл YAG:Nd<sup>3+</sup> 3 имел диаметр 5 мм и длину 100 мм. Выходная мощность лазера, работающего в непрерывном режиме, составляла 20 Вт. Излучение фокусировалось телескопом Галилея 5, 6 в точке 7, причем расстояние до места фокусировки можно изменять от 1 до 60 м. Измерения проводились в случае, когда в области фокусировки (10 мкм) находилось не более одной частицы. Часть рассеянного аэрозолем излучения, собираемая телескопом, поступает обратно в лазер. Кинетика генерации лазера контролировалась фотоприемником 8 (ФД-256). Сигнал, поступающий с фотоприемника, усиливался предусилителем 9. Высокочастотная составляющая сигнала выделялась фильтром 10 и поступала на вход режекторного фильтра 11, подавляющего составляющую сигнала на частоте релаксационных колебаний  $\omega_p$ . Далее сигнал оцифровывался АЦП 12. Запуск АЦП осуществлялся генератором тактовых импульсов 13, работой которого управлял триггер Шмидта 14, переключаемый из одного устойчивого состояния в другое в случае перехода сигнала амплитудного детектора 15 через уровень, расположенный несколько выше уровня шума в паузах между пролетом частиц. Через крейт-контроллер АЦП и ОЗУ были связаны с микроЭВМ «MERA-660» 16, на которой проводился

анализ сигнала. На рис. 2 представлен доплеровский сигнал, полученный от одной из частиц аэрозоля. В случае большого отношения сигнал—шум период сигнала определяется из числа пересечений нулевого уровня за некоторое время. При амплитудах сигнала, сравнимых с амплитудой шума, период определяется из автокорреляционной функции сигнала.

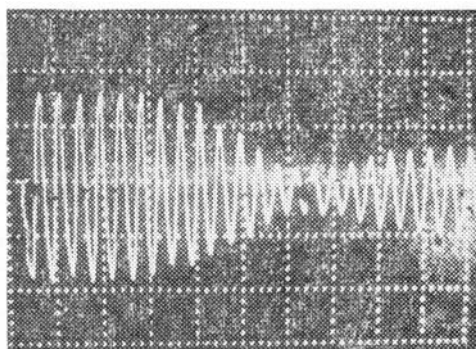


Рис. 2. Оциллограмм доплеровского сигнала

Анализ последовательности доплеровских сигналов позволяет построить распределение рассеивающих частиц по скоростям, из которого можно определить наиболее вероятную скорость частиц, среднюю скорость, дисперсию скорости. Последняя дает представление о характере движения воздушного потока. Так, например, малая ширина распределения свидетельствует о ламинарном, направленном характере движения потока воздуха, а распределение без выраженного максимума о турбулизации потока. На рис. 3, а показано распределение свободно падающих частиц аэрозоля, радиусом порядка 8 мкм, по скоростям. Среднее значение скорости в данном случае 1,1 см/с. Оценка предельной скорости падения частицы в вязкой среде, из закона Стокса, дает величину порядка 0,7 см/с. Распределение частиц по скоростям, представленное на рис. 3, б, соответствует свободному падению с дополнительной конвекцией.

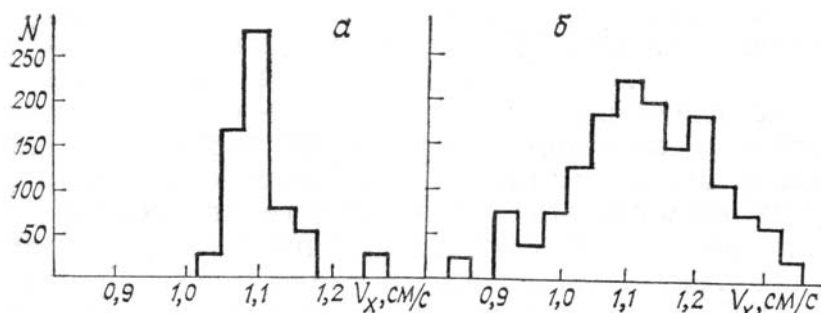


Рис. 3

В турбулентном потоке зависимость скорости частицы от времени носит случайный характер, соответственно частота доплеровского сигнала будет являться случайной функцией времени. Как и в случае ускоренного движения частиц аэрозоля, сигнал модулируется по частоте и модулирующая функция содержит информацию о функции  $v(t)$ , а следовательно, и о законе изменения ускорения  $a(t)$ . В сильно турбулизованном потоке или потоке, движущемся с большим ускорением, частицы заметно меняют скорость уже на масштабах порядка измерительного объема, поэтому отношение несущей частоты к девиации за время пролета может достигать нескольких единиц, то есть частица успевает значительно изменить свою скорость уже за три-четыре периода доплеровского сигнала.

Демодуляция сигналов с большой скоростью девиации частоты (когда не выполняется  $\frac{d\omega}{dt} \ll \omega^2$ ) проводилась следующим образом. Частота оцифровки выбиралась значительно выше частоты доплеровского сигнала. При этом каждый участок сигнала, содержащий не более трех значений, соответствовал сигналу с фиксированной частотой, которая определялась как  $\omega(t_j) = \sqrt{\dot{I}(t_j)/I(t_j)}$ , где  $\dot{I}(t_j)$  — вторая производная сигнала в  $j$ -й момент времени. В рассчитанной таким образом функции  $\omega(t)$ , естественно, содержатся скачки второй производной в точках перегиба сигнала. Эти выбросы достаточно хорошо фильтруются при помощи полосовых фильтров на основе алгоритмов БПФ или более простых рекурсивных фильтров, реализованных также программно. Для проверки работоспособности подобной демодуляции и ее качества регистрировался сигнал от частиц водного аэрозоля, облучаемых акустической волной, которая создавалась динамической головкой 35-ГДН. Перемещение легких частиц

при этом соответствует перемещению диффузора. На рис. 4,а показан доплеровский сигнал от частицы, а на рис. 4,б и 4,в скорость движения диффузора динамической головки и результат демодуляции сигнала соответственно. Как видно из сравнения рис. 4,б и 4,в, используемый способ демодуляции позволяет получать удовлетворительные результаты. Функция ускорения  $a(t)$  получается путем дифференцирования функции скорости:  $a(t) = dv(t)/dt$ .

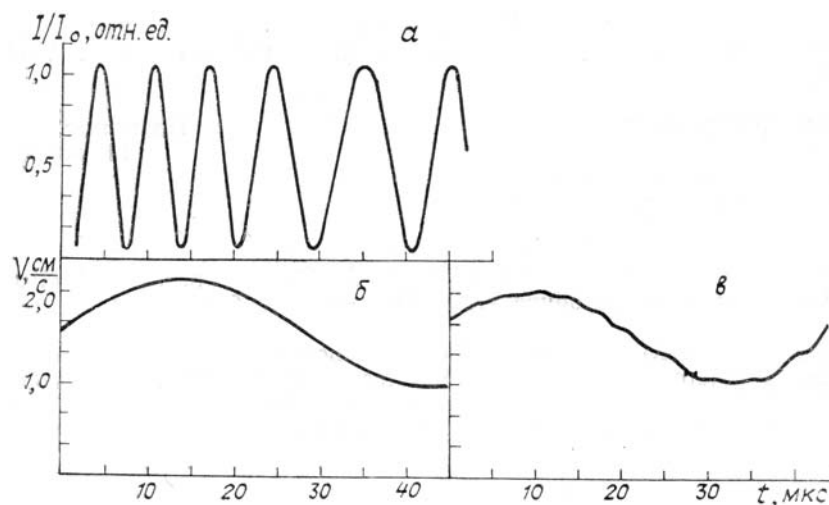


Рис. 4

Макет автодинного доплеровского анемометра имеет следующие характеристики. Максимально регистрируемая концентрация частиц аэрозоля составила величину  $1,5 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ , которая ограничивалась скоростью анализа сигнала. Минимально регистрируемая скорость 36 мкм/с определялась полосой спектра шума лазера, а максимальная — 2 см/с быстродействием АЦП. Минимальное полное сечение рассеяния  $1,2 \cdot 10^{-10} \text{ мкм}^2$  соответствовало размеру частицы порядка 1 мкм. Дальность зондирования достигла 60 м. Таким образом, экспериментально показана возможность дистанционного определения микрофизических параметров аэрозоля. Использование стабилизированного источника питания лазера, внесевого зеркального телескопа и быстродействующих АЦП позволит существенно расширить технические характеристики анемометра данного типа.

В заключение необходимо отметить перспективность применения автодинных анемометров при исследовании плазмы, пламен и т.п. в связи с высокой помехозащищенностью системы от фоновых засветок, реализуемой в когерентном приеме эхо-сигнала на лазер.

1. Дубнищев Ю. Н., Ринкевичус Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука. 1982. 304 с.
2. Gordov E. P., Godlevskii A. P., Ponurovskii Ya. Ya. et al. // App. Opt. 1987. V. 26. № 9. P. 1607—1611.
3. Zuev V. E., Godlevskii A. P., Kopytin Yu. D. et al. // Opt. Comm. 1987. V. 62. №6. P. 370—373.
4. Zuev V. E., Burakov S. D., Godlevskii A. P. et al. // 13th Int. Laser Radar Conf. NASA Conf. Publ. 2431. Abstr. pap. Ottawa. 1986. P. 125.
5. Zuev V., Burakov S. D., Godlevsky A. P. et al. // 13th Int. Symp. of the IMEKO TC-2. Abstr. pap. Braunschweig. 1987. P. 49.
6. Викторов Е. А., Галактионова Н. М., Мак А. А., и др. // Оптика и спектроскопия. 1987. Т. 62. Вып. 2. С. 430—436.
7. Lawrence T. R., Wilson D. J., Craven C. E. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1972. V. 43. № 4. P. 512.
8. Бураков С. Д., Копытин Ю. Д. // В кн.: 8 Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. 2. (Тезисы докл.). Томск. 1984. С. 78—81.

СКВ научного приборостроения «Оптика» СО АН СССР,  
Томск  
Институт оптики атмосферы СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию  
21 ноября 1988 г.

S. D. Burakov, A. P. Godlevsky, S. A. Ostanin. **Aerosol Microphysical Parameter Measurements by Autodyne YAG:Nd<sup>3+</sup>-Laser Transceiver.**

An autodyne cw YAG:Nd<sup>3+</sup>-laser Doppler anemometer was studied experimentally. The results obtained are reported. The feasibility of remote sensing of aerosol microphysical parameters, such as aerosol particle velocity, acceleration, size, scattering cross-section, and number density, by means of the proposed system is shown.