

И. К. Кабардин^{1}, В. Г. Меледин¹, С. В. Двойнишников¹, К. С. Зубанов¹*

Развитие метода фазовой доплеровской анемометрии с объектом измерения в виде цилиндра

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: ivankabardin@gmail.com

Аннотация. Разработка методов для диагностики размеров частиц в аэродинамическом потоке является актуальной задачей в ряде технических приложений, таких как двигателестроение, энергетика, нанесение покрытий и других. Одним из методов для диагностики размеров частиц является метод фазовой доплеровской анемометрии (PDA). Он представляет собой лазерный оптический метод для одновременного измерения скорости и размеров сферических частиц. Целью данной работы является проверка работоспособности метода, который реализует фазовую доплеровскую анемометрию для получения зависимости сдвига фаз на фотоприемниках от диаметров проволочек. В работе приведена дифференциальная оптическая схема установки с гелий-неоновым лазером в качестве источника излучения.

Ключевые слова: фазовый доплеровский анемометр, фаза, эффект Доплера, частица

I. K. Kabardin^{1}, V. G. Meledin¹, S. V. Dvoinishnikov¹, K. S. Zubanov¹*

Development of the Method of Phase Doppler Anemometry with a Measurement Object in the Form of a Cylinder

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: ivankabardin@gmail.com

Abstract. The development of methods for diagnosing particle sizes in an aerodynamic flow is an urgent task in a number of technical applications such as engine building, energy, coatings and others. One of the methods for diagnosing particle sizes is the phase Doppler anemometry (PDA) method. It is a laser optical method for simultaneously measuring the speed and size of spherical particles. The purpose of this work is to test the performance of a method that implements phase Doppler anemometry to obtain the dependence of the phase shift on photodetectors on the diameters of the wires. The paper presents a differential optical scheme of the installation with a helium-neon laser as a radiation source

Keywords: phase Doppler anemometer, phase, Doppler effect, particle

Введение

Метод фазовой доплеровской анемометрии (PDA) представляет собой лазерный оптический метод для одновременного измерения скорости и размеров сферических частиц, позволяющий проводить измерения с высокой точностью и пространственным разрешением. Скорость определяется сдвигом частоты света, который рассеивается частицей, пролетающей через интерференционный объем как минимум двух пересекающихся лазерных пучков. Для измерения размера ча-

стиц используется тот факт, что рассеянный свет, который получен с двух разных направлений наблюдения, имеет разницу фаз, которая пропорциональна диаметру частицы. Поскольку это соотношение справедливо как для прозрачных, так и для непрозрачных частиц, метод может использоваться для различных приложений, например, для исследования капель в водных, топливных или лакокрасочных аэрозолях, для исследования пузырьков в жидкостях и др. В рамках данной работы решена задача нахождения размеров частиц, используя метод PDA.

Теоретическая часть

Метод лазерной доплеровской анемометрии (LDA) представляет собой невозмущающий оптический метод на основе интерференции света. При измерениях LDA используются два лазерных пучка с одинаковой длиной волны, пересекающиеся в фокусе, образуя небольшой измерительный объем. Небольшой сдвиг частоты, генерируемый с помощью ячейки Брэгга, приводит к появлению интерференционных полос вблизи этого фокуса. Интерференция двух лазерных лучей приводит к чередованию ярких и темных полос, отражающих модуляцию интенсивности. Эти полосы параллельны угловой биссектрисе падающих лазерных лучей. Согласно теории плоских волн, ширина этих интерференционных полос может быть определена по формуле:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}}, \quad (1)$$

где d – ширина интерференционной полосы, λ – длина волны падающих лазерных лучей, θ – угол между двумя падающими лучами. Когда частица пересекает эти полосы, интенсивность самая высокая на светлых полосах и самая слабая на темных. Это рассеяние света измеряется, создавая сигнал с доплеровским сдвигом, который прямо пропорционален скорости частиц, перпендикулярный биссектрисе падающих лучей, как описано в уравнениях:

$$f_D = \frac{1}{t} = \frac{U_p}{d}, \quad (2)$$

$$f_D = \frac{2 \sin \frac{\theta}{2} U_p}{\lambda} \Leftrightarrow U_p = \frac{1}{2} \frac{f_D \lambda}{\sin \frac{\theta}{2}}, \quad (3)$$

где f_D – доплеровский сдвиг, t – время перехода через полосу, а U_p – скорость частицы, перпендикулярная биссектрисе угла падающих лучей. Скорость частиц можно найти по формуле (3). Фотоумножители преобразуют флуктуации интенсивности рассеяния и превращают в электрический сигнал доплеровских импульсов. Этот сигнал фильтруется и усиливается с помощью процессора сигналов, а доплеровский сдвиг получается из спектрального анализа обработанного цифрового сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) – рис. 1.

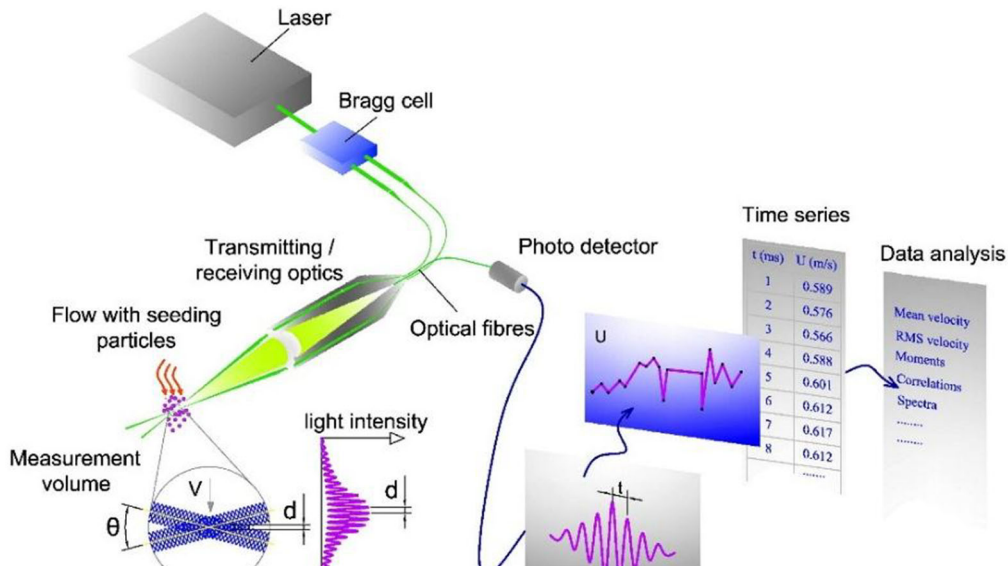


Рис. 1. Анализ обработанного цифрового сигнала

Принцип LDA можно описать иным способом, используя эффект Доплера, который указывает на изменение частоты или длины волны света. Движущаяся частица воспринимает плоские световые волны, излучаемые лазером, и передает их на стационарные фотоприемники. Этот процесс приводит к дополнительному доплеровскому сдвигу при приеме рассеянного света от неподвижного наблюдателя. Затем, частота света, поступающего на фотодетектор, может быть определена по формуле:

$$f_r = f_e \frac{1 - \frac{\vec{v} \cdot \vec{l}}{c}}{1 - \frac{\vec{v} \cdot \vec{k}}{c}}, \quad (4)$$

где f_e – частота лазерного источника, \vec{v} – скорость движущейся частицы, c – скорость света, \vec{k} , \vec{l} – единичные векторы в направлении падающего света и направлении света, передаваемого от частицы к приемнику. Сдвиг частоты f_D , возникающий из-за рассеянного света, получаемого от двух падающих лучей, можно выразить по формуле:

$$f_D = f_{r1} - f_{r2}. \quad (5)$$

При измерениях LDA, если для исследования доплеровского сдвига используются несколько детекторов, сигналы сдвига, одновременно принимаемые этими детекторами, аналогичны, хотя между ними существуют разности фаз, пропорциональные размеру частиц (рис. 2).

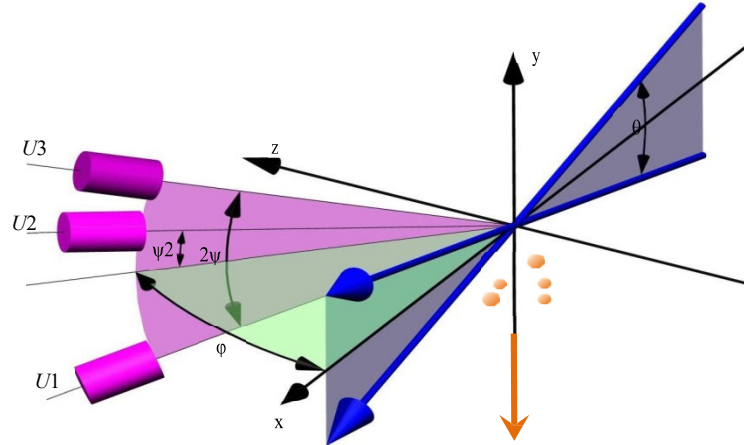


Рис. 2. Схема фазовой доплеровской анемометрии

Учитывая только преломление первого порядка, корреляция между разностью фаз и размером частиц равна

$$\Delta\Phi^{(p=2)} \approx -2 \frac{2\pi}{\lambda} d_p \frac{m \sin \psi \sin \frac{\theta}{2}}{v \sqrt{1 + m^2 - mv}}, \quad (6)$$

где $\Delta\Phi^{(p=2)}$ – разность фаз между полосами двух детекторов, расположенных под углами $\pm\psi$, $\pm\varphi$ – углы внеосевого рассеяния, m – отношение показателей преломления между частицей и фазой носителя, v – функция параметра, описываемая следующим образом:

$$v = \sqrt{2} \sqrt{1 + \cos \psi \cos \varphi \cos \frac{\theta}{2}}. \quad (7)$$

Методы фазового Доплера используют полнофункциональный прибор, который обнаруживает частицы размером до 300 нм в диаметре (в зависимости от чувствительности детектора), для концентраций от 10^4 до 10^5 частиц/см³. Когда размер частиц превышает измеряемый объем, трудно отличать преломленный свет первого порядка от отраженного света. Следовательно, любое определение размера частиц, непосредственно рассчитанное по доплеровской разности фаз, приведет к существенной ошибке.

Экспериментальная часть

Стенд представлен на рис. 3. Из лазера 1 мощностью 15 мВт с длиной волны 650 нм исходит пучок света диаметром 2 мм. Пучок проходит через светоделительный кубик 2, где разделяется на два луча, которые далее проходят через линзу 3, после которой сходятся в измерительном объеме 4. В измерительном объеме диаметр сфокусированных лучей составляет 50 мкм. В качестве частиц использованы натянутые лески различного диаметра в интервале 80–180 мкм. Рассеянный сигнал от проволоочки регистрировался двумя фотоэлектронными умножителями Hamamatsu 5, 6, угол между которыми был равен 1° , через многомодовое оптоволокно, установленное под углом 60° . Сигнал с ФЭУ регистрировался и анализировался на цифровом осциллографе Rigol DS1054 7.

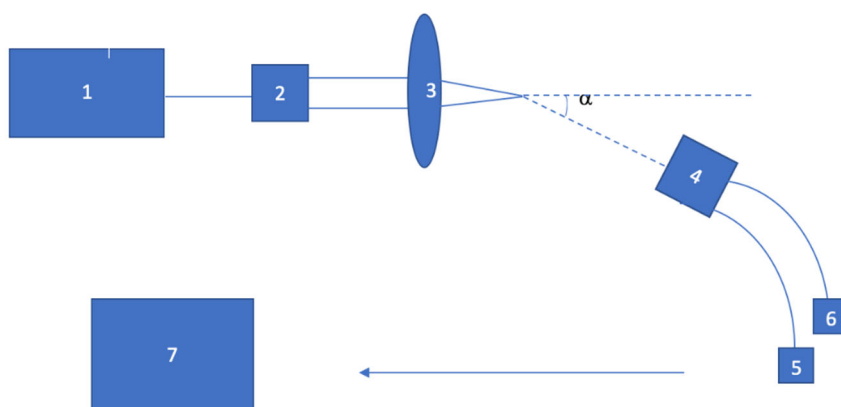


Рис. 3. Схема рабочего участка

Результаты

Сигнал, регистрируемый в экспериментах, отображен на рис. 4 а, б. Измерение фазы между соседними сигналами происходит между соответствующими цугами синусоиды.

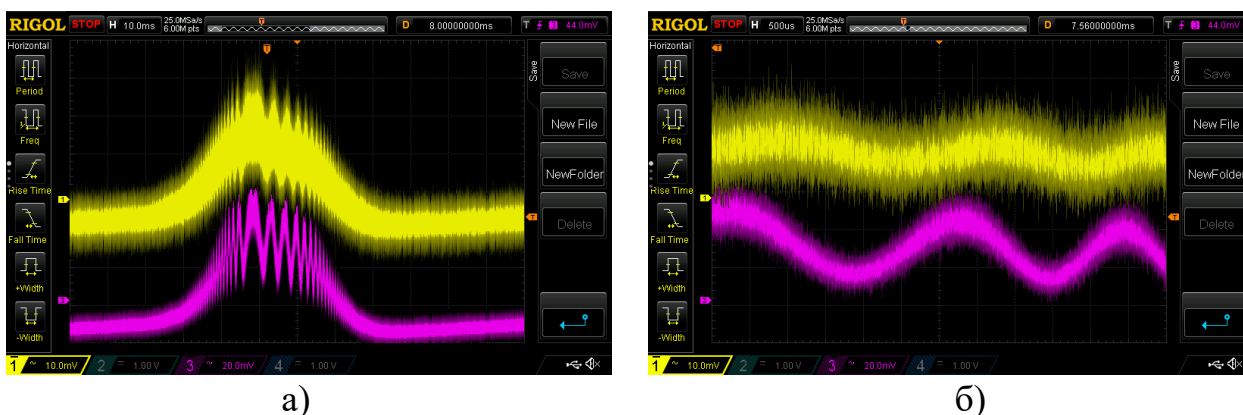


Рис. 4. Осциллограмма сигналов с фотоприемников: а) в нормальном масштабе, б) в увеличенном масштабе

Результат экспериментов отображен на рис. 5.

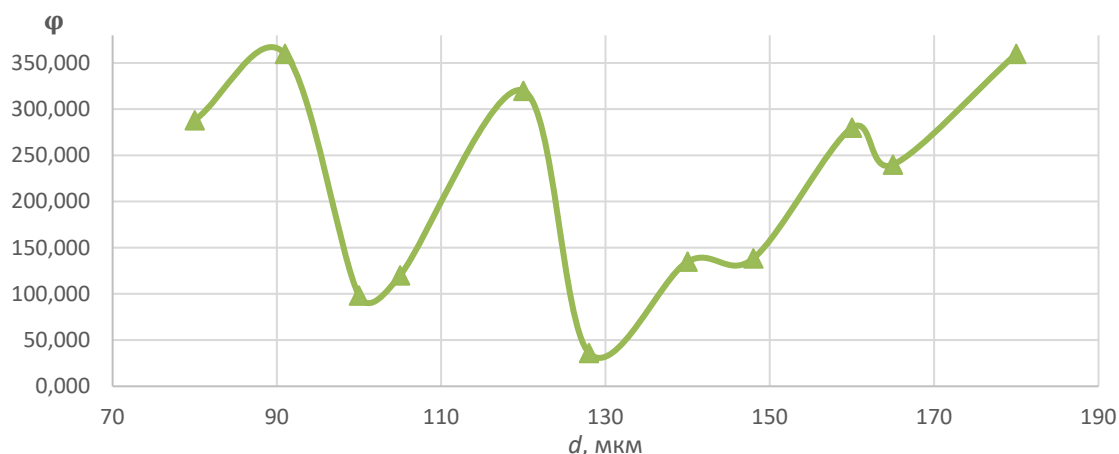


Рис. 5. Зависимость фазы от диаметра частиц

Как видно из рис. 5, увеличение фазы приводит к обнулению фазы при переходе через период. Наблюдается три периода. Если прибавить для каждой фазы по 360 градусов на период, то получится результат, представленный на рис. 6. Видно, что зависимость практически линейная.

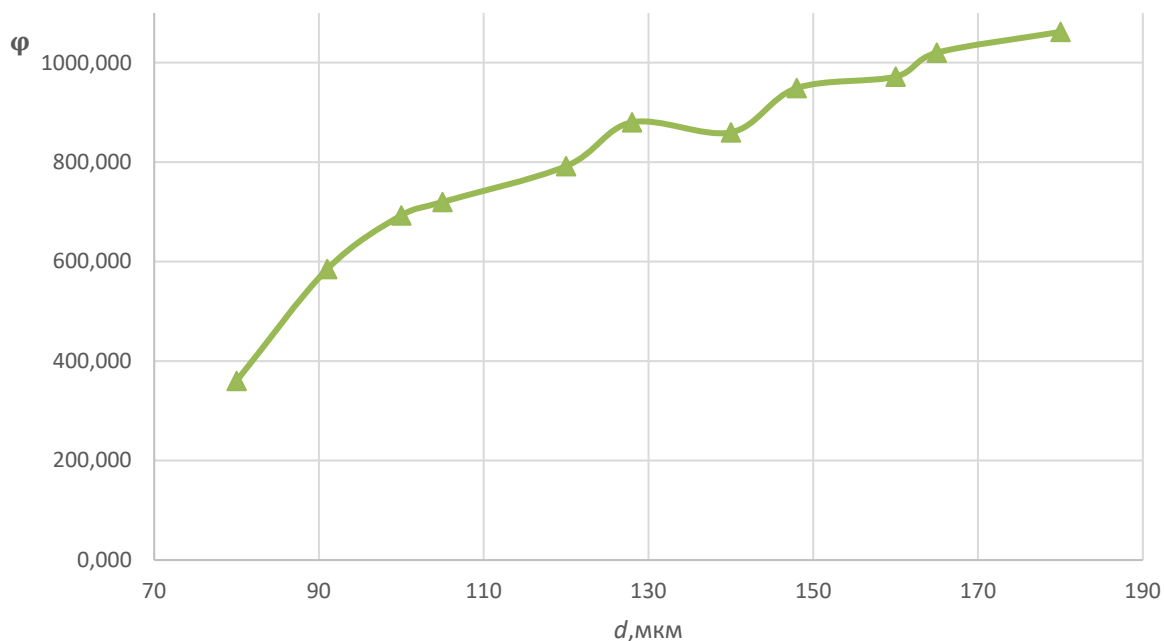


Рис. 6. Зависимость фазы от диаметра частиц

Заключение

Развит метод фазовой доплеровской анемометрии для измерения размеров частиц. В качестве частиц использованы лески с диаметром в диапазоне 80–

180 мкм. Показана работоспособность метода. Показано что фаза возрастает с размером практически линейно.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bauckhage, K., Floegel, H. Simultaneous measurement of droplet size and velocity in nozzle sprays. In Proceedings of the 2nd International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2–5 July 1984; pp. 18.1.1–18.1.6.
2. Меледин В. Г. Информатика оптоэлектронных измерений: наука и инновационные промышленные технологии // Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 2008. – 106. С.
3. Bachalo, W.D., Houser, M.J. Phase/Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distributions. Opt. Eng. 1984, 23, 583–590.
4. Albrecht, H.E., Wenzel, M., Borys, M. Influence of the Measurement Volume on the Phase Error in Phase Doppler Anemometry. Part 2: Analysis by extension of geometrical optics to the laser beam; Refractive mode operation. Part. Part. Syst. Charact. 1996, 13, 18–26.

© И. К. Кабардин, В. Г. Меледин, С. В. Двойнишников, К. С. Зубанов, 2024