

К. С. Зубанов^{1,2}✉, И. К. Кабардин¹, С. В. Двойнишников¹, В. Г. Меледин¹

Простой одночастотный дифференциальный оптический ЛДА

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: k.zubanov@g.nsu.ru

Аннотация. В статье представлена усовершенствованная конструкция лазерного доплеровского анемометра (ЛДА), в которой традиционные акустооптические модуляторы заменены компактным светоделительным кубом, а для детектирования сигналов применен кремниевый микропиксельный фотодетектор. Эксперименты включали измерения скорости частиц в потоке с использованием вращающегося диска с метками, а также тестирование системы на аэрозольных каплях, частицах дыма и в условиях затопленной струи. Результаты подтвердили линейную связь между доплеровской частотой и скоростью частиц с коэффициентом пересчета, стабильность которого не превышала 10% отклонения от среднего значения 101,6 кГц. Продемонстрирована возможность регистрировать сигнал на различных объектах, имитирующих частицы в физических экспериментах. Наибольшее отношение сигнал-шум (SNR) достигнуто для аэрозольных капель, тогда как в условиях погружной струи на качество данных влияли поглощение света и оптические искажения. Разработанная система демонстрирует возможность отказа от сложных компонентов, таких как ячейки Брэгга, без снижения точности. Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией измерений для слаборассеивающих частиц и разработкой методов компенсации помех в погружных средах.

Ключевые слова: лазерная доплеровская анемометрия, светоделительный куб, микропиксельный фотодетектор

K. S. Zubanov^{1,2}✉, I. K. Kabardin¹, S. V. Dvoynishnikov¹, V. G. Meledin¹

Simple single-frequency differential optical LDA

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: k.zubanov@g.nsu.ru

Abstract. The article presents an improved design of a laser Doppler anemometer (LDA), where traditional acousto-optic modulators are replaced with a compact beam-splitting cube, and a silicon micro-pixel photodetector is employed for signal detection. Experiments included velocity measurements of particles in a flow using a rotating disk with engraved markers, as well as system testing with aerosol droplets, smoke particles, and in submerged jet conditions. The results confirmed a linear relationship between the Doppler frequency and particle velocity, with a conversion factor demonstrating stability within 10% deviation from the mean value of 101.6 kHz. The system's ability to detect signals from various objects simulating particles in physical experiments was demonstrated. The highest signal-to-noise ratio (SNR) was achieved for aerosol droplets, while in submerged jet conditions, data quality was affected by light absorption and optical distortions. The developed system demonstrates the feasibility of eliminating complex components, such as Bragg cells. Future

research prospects are associated with optimizing measurements for low-scattering particles and developing methods to compensate for interference in submerged environments.

Keywords: laser Doppler anemometry, beam-splitting cube, micro-pixel photodetector

Введение

Лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) остается ключевым инструментом в экспериментальной гидродинамике с момента ее создания в 1964 г. [1]. Этот бесконтактный метод обеспечивает точное измерение скорости за счет регистрации доплеровского сдвига лазерного излучения, рассеянного движущимися частицами, и характеризуется высоким пространственным и временным разрешением [2]. За десятилетия метод ЛДА значительно эволюционировал, найдя применение в аэродинамике, исследованиях горения и мониторинге промышленных процессов [3, 4]. На сегодняшний день лазерная доплеровская анемометрия является одним из наиболее точных оптических методов измерения скорости частиц в потоках жидкостей, обеспечивая диагностику с погрешностью менее 0,1%. Сочетание высокой точности, широкого динамического диапазона и разрешения делает ее незаменимой для фундаментальных исследований турбулентности, верификации расчетных моделей вычислительной гидродинамики и анализа промышленных потоков, где традиционные методы недостаточно эффективны.

Современные разработки направлены на создание компактных и экономичных систем ЛДА без потери точности [5]. Классические конфигурации часто требуют сложных оптических схем с акустооптическими модуляторами (ячейками Брэгга) и объемными компонентами, что повышает стоимость и сложность юстировки. В данной работе предложена инновационная конструкция ЛДА на основе кубического делителя пучка, который формирует два когерентных лазерных пучка, исключая необходимость использования ячеек Брэгга и упрощая систему.

Важным элементом разработки стали кремниевые лавинные фотодетекторы с микропиксельной структурой, способные заменить современные фотоумножители в оптических схемах [6]. Производительность системы оценивалась на тестовых объектах, включая аэрозольные капли и частицы дыма, имитирующие типичные рассеивающие среды в гидродинамике. Такие измерения позволили проверить способность прибора работать с частицами различных размеров, форм и отражательными способностями.

Исследование отвечает растущему спросу на доступные и портативные системы для измерения скорости в научных и промышленных задачах. Использование современных оптических компонентов и упрощенной схемы позволяет повысить доступность лазерной анемометрии без ущерба для точности. Результаты работы способствуют развитию компактных и универсальных анемометров для исследований в области гидродинамики.

Методы и материалы

В данной работе скорость частиц измерялась в объеме пересечения двух лазерных пучков. Размер области измерения обычно составлял несколько милли-

метров в длину. Интенсивность света модулировалась вследствие интерференции между лазерными пучками, что привело к формированию параллельных плоскостей высокой интенсивности света – так называемых интерференционных полос. Расстояние между интерференционными полосами d_f зависит от длины волны лазерного излучения (λ) и угла между пучками (α):

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (1)$$

Сдвиг частоты при рассеянии света движущейся частицей однозначно определяется проекцией вектора скорости частицы $\vec{V}$ на вектор чувствительности $\vec{K}$ (рис. 1). Выражение для доплеровского сдвига частоты имеет вид:

$$\omega_D = 2kV \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos(\varphi). \quad (2)$$

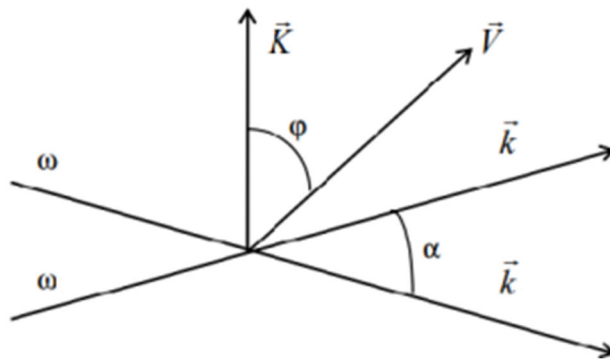


Рис. 1. Дифференциальная оптическая схема системы ЛДА

Оптическая схема прототипа лазерного доплеровского анемометра, использованного в данной работе и основанного на кубическом делителе пучка, представлена на рис. 2. Лазерный пучок от лазера (1) ($\lambda = 660$ нм, 150 мВт) направлялся на фокусирующую линзу (2), которая формировала перетяжку пучка в пространстве. Путем замены линзы и использования комбинаций рассеивающих и собирающих линз можно было регулировать положение перетяжки пучка вдоль лазерного луча, что необходимо для правильной юстировки прибора. После прохождения через кубический делитель пучка (3) ($20 \times 20 \times 20$ мм) лазерный пучок разделялся на два когерентных пучка с соотношением интенсивностей 1:3. Кубический делитель пучка задавал точку пересечения двух лазерных пучков. Затем разделенные пучки направлялись в исследуемую область потока. При пересечении в потоке лазерные пучки формировали интерференционную картину с известной пространственно-временной периодической структурой. Свет, рассе-

янный частицами, собирался объективом (4) и фокусировался через оптический фильтр (5) и апертуру (6) на фотодетектор (7) (микропиксельный лавинный кремниевый фотодетектор).

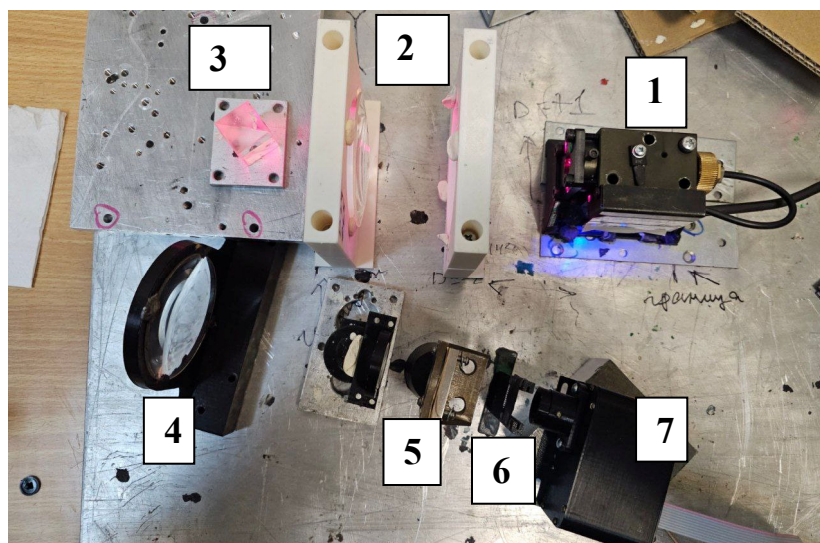


Рис. 2. Фотография макета лазерного доплеровского анемометра

Результаты

Эксперименты были проведены для проверки работоспособности оптической схемы лазерного доплеровского анемометра на основе кубического делителя пучка с микропиксельным лавинным кремниевым фотодетектором. Основной целью являлось исследование зависимости частоты доплеровского сигнала от скорости частиц в измерительном объеме. Для этого использовался вращающийся прозрачный диск с нанесенными метками. Скорость вращения регулировалась с помощью генератора частоты. Линейная скорость каждой метки, проходящей через измерительный объем, рассчитывалась на основе частоты вращения диска и его радиуса ($R=5,3$ см). Частота генератора варьировалась в диапазоне от 20 до 400 Гц, при этом одному полному обороту диска соответствовала частота 200 Гц. Полученная зависимость доплеровской частоты от скорости представлена на рис. 3.

График демонстрирует линейную зависимость между доплеровской частотой и скоростью. Однако, для прецизионных измерений ЛДА необходимо знать коэффициент преобразования доплеровской частоты в скорость. Данный коэффициент может быть получен из отношения доплеровской частоты к соответствующей скорости (рис. 4).

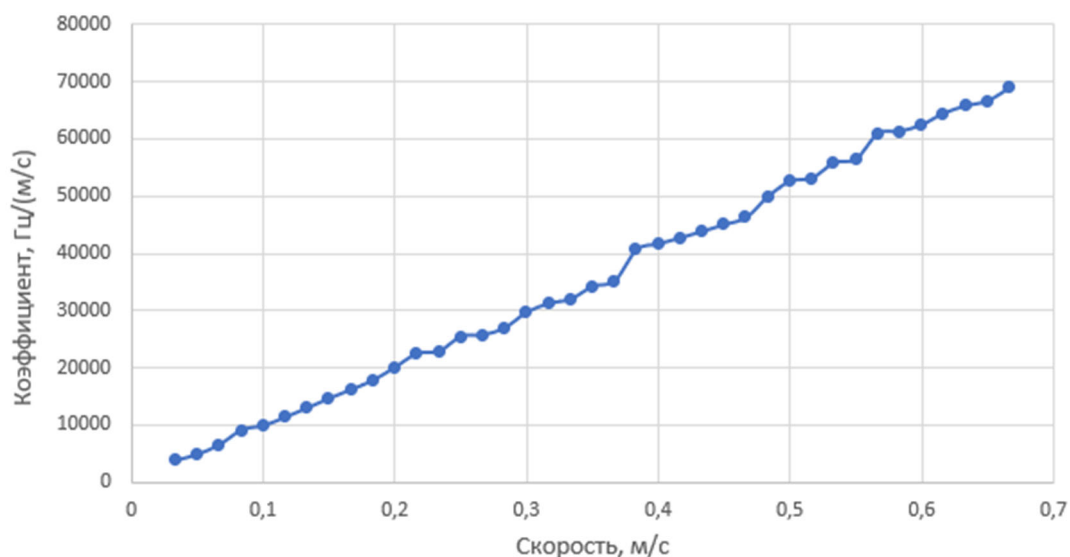


Рис. 3. Зависимость частоты доплеровского сигнала от скорости

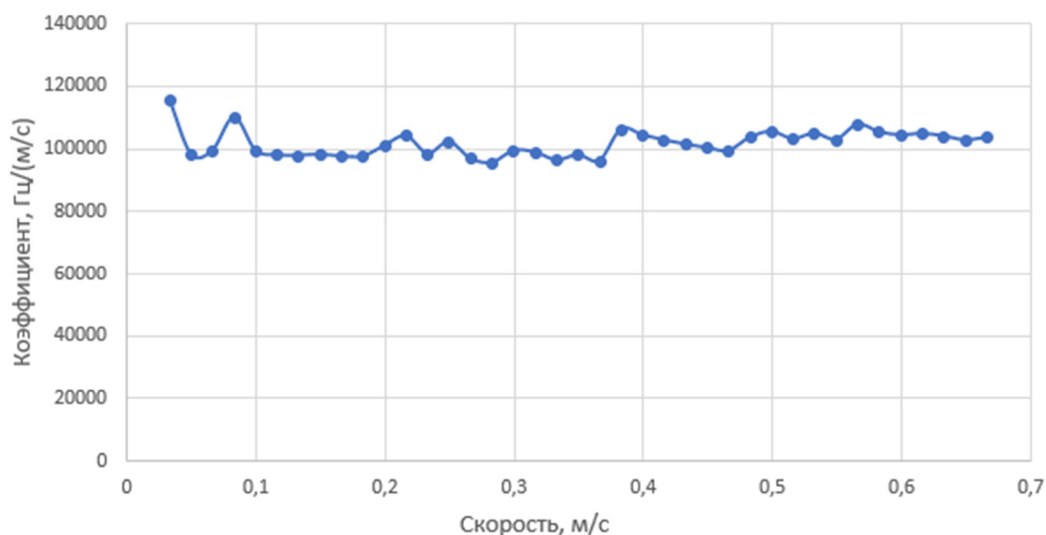


Рис. 4. Зависимость коэффициента преобразования от скорости

Способность системы измерять скорости различных частиц была проверена на следующих объектах: капли воды из увлажнителя, частицы дыма, частицы в затопленной струе. На рис. 5 показаны доплеровские сигналы от этих тестовых объектов. Как обсуждалось ранее, капли из увлажнителя служили идеальными рассеивающими целями благодаря их высокой отражательной способности, обеспечивая сигналы более высокого качества. Отношение сигнал-шум (SNR) было наивысшим для аэрозольных капель и значительно ниже для частиц дыма. Хотя погружная струя создавала самые слабые сигналы, они оставались обнаруживаемыми.

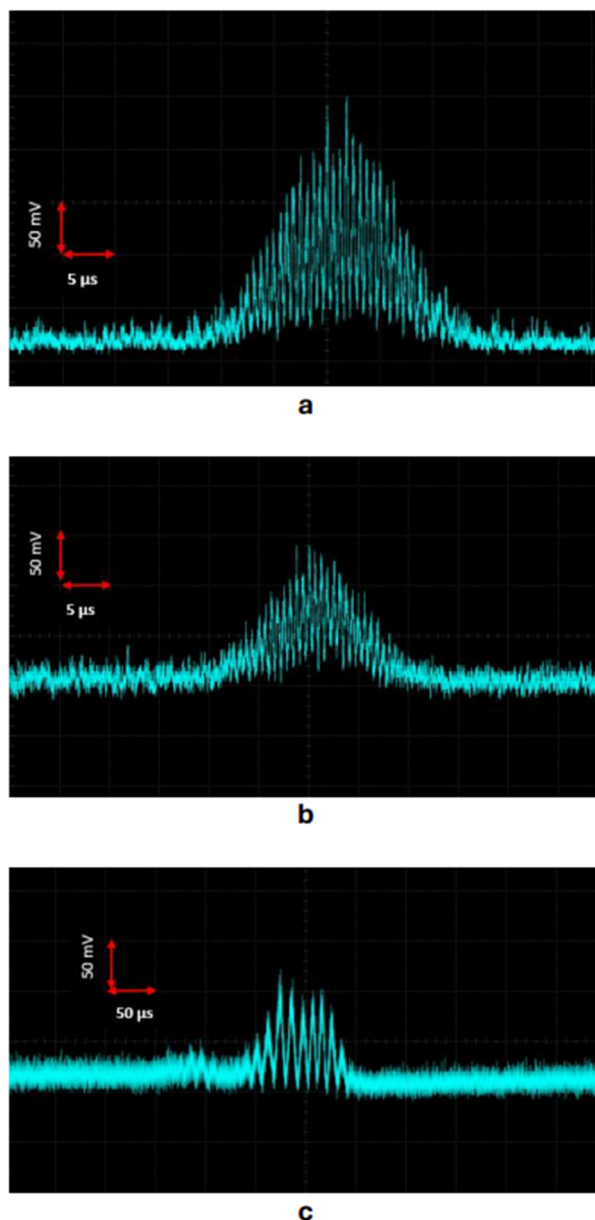


Рис. 5. Осциллограммы сигналов с различных тестовых объектов:
 а) капли с увлажнителя воздуха; б) частицы дыма;
 с) частицы в затопленной струе

Обсуждение

Разработанная оптическая схема ЛДА успешно регистрировала сигналы как от объектов с высокой отражательной способностью (капли из увлажнителя), так и с низкой (частицы дыма), демонстрируя линейную зависимость доплеровской частоты от скорости (рис. 3), что подтверждает работоспособность прототипа.

Кубический делитель пучка определяет угол пересечения лазерных пучков, регулируя количество интерференционных полос в измерительном объеме. Следовательно, его размеры критически важны для проектирования ЛДА. В свою очередь, отношение полезного сигнала к шуму может быть увеличено за счет

уменьшения полосы пропускания фотодетектора, однако ценой сокращения диапазона измеряемых скоростей.

Заключение

В данном исследовании успешно продемонстрирована работоспособность компактной системы лазерного доплеровского анемометра (ЛДА), основанной на кубическом делителе пучка и микропиксельном лавинном фотодетекторе. Ключевым результатом является то, что данная упрощенная конфигурация обеспечивает точное измерение скоростей жидкостей, что подтверждается линейной зависимостью между доплеровской частотой и скоростью частиц при постоянном коэффициенте преобразования.

Эффективность системы подтверждается воспроизводимыми измерениями в различных условиях, включая успешную регистрацию сигналов как от идеальных рассеивающих целей (капли воды), так и от сложных объектов (частицы дыма).

Значимость результатов заключается в доказательстве возможности замены сложных ячеек Брэгга на простые оптические схемы без потери точности измерений. Это делает технологию ЛДА более доступной для образовательных и промышленных применений, где ключевыми факторами являются стоимость и простота.

Будущие исследования должны быть сосредоточены на разработке методики коррекции границ раздела для измерений за иллюминаторами и оптимизации оптической схемы для расширения диапазона измерений скоростей слабо-рассеивающих частиц. Эти улучшения повысят универсальность системы, сохранив ее преимущества в виде простоты и экономической эффективности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yeh Y. and Cummins H. Z. 1964 Localized fluid flow measurements with a HeNe laser spectrometer Appl. Phys. Lett. 4 176–8.
2. Drain L. E. 1980 The Laser Doppler Technique (Chichester: Wiley).
3. Durst F, Melling A and Whitelaw J H 1976 Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry (London: Academic).
4. Tropea C 1995 Laser Doppler anemometry: recent developments and future challenges Meas. Sci. Technol. 6 605–19.
5. Czarske J 2006 Laser Doppler velocimetry using powerful solid-state light sources Meas. Sci. Technol. 17 R71–91.
6. V V Rakhmanov et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 2057 012088.

© К. С. Зубанов, И. К. Кабардин, С. В. Двойнишников, В. Г. Меледин, 2025