

*И. К. Кабардин<sup>1\*</sup>, В. Г. Меледин<sup>1</sup>, В. А. Павлов<sup>1</sup>, К. С. Зубанов<sup>1</sup>*

## **История развития метода фазовой доплеровской анемометрии**

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

**Аннотация.** Способность регулярно проводить одновременные измерения размера и скорости отдельных сферических частиц считается важнейшим компонентом достижений измерительной техники многофазных систем. Двухлучевой интерферометр, фазово-доплеровский измеритель скорости частиц, обеспечил эту возможность. Развитие метода прослеживается со времен лазерной доплеровской анемометрии (ЛДВ) в начале 1970-х годов, а кульминация работ завершилась в нескольких лабораториях в середине 1980-х годов.

**Ключевые слова:** фазовый доплеровский анемометр, спекл-структура, измерение размеров частиц

*I. K. Kabardin<sup>1\*</sup>, V. G. Meledin<sup>1</sup>, V. A. Pavlov<sup>1</sup>, K. S. Zubanov<sup>1</sup>*

## **History of the Development of the Phase Doppler Anemometry Method**

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

**Abstract.** The ability to routinely make simultaneous measurements of the size and velocity of individual spherical particles is considered a critical component of advances in multiphase system measurement technology. The Dual Beam Interferometer, a phase-Doppler particle velocity meter, provided this capability. The development of the method can be traced back to laser Doppler anemometry (LDA) in the early 1970s, culminating in several laboratories in the mid-1980s.

**Keywords:** phase Doppler anemometer, speckle structure, particle size measurement

### ***Введение***

После своего изобретения в конце 1960-х и начале 1970-х годов лазерный доплеровский велосиметр (ЛДВ) стал повсеместным инструментом для исследователей в механике жидкости и газа. Основная цель ЛДВ заключается в обеспечении измерения скорости потоков жидкости. Обычно в качестве трассеров используются мелкие частицы или пузырьки. Другой величиной, представляющей интерес, является размер частиц. Благодаря широкой доступности приборов ЛДВ, значительный интерес вызвала возможность извлечения информации о размерах из электрооптических систем на основе незначительных модификаций или дополнений к ЛДВ. Исследователи действовали весьма активно и творчески в этой области, и был разработан ряд методов. Один из них, известный сегодня как метод фазовой доплеровской анемометрии (ФДА), стал важным прорывом в 1975 году. История оптических приборов для практического количественного

определения аэрозолей насчитывает около тридцати лет, которые можно разделить на три десятилетия. В период 1965-1975 годов методы электронной визуализации были преобладающим методом определения характеристик аэрозолей сравнительно крупных частиц ( $>5-10$  мкм). Следующие десять лет можно назвать десятилетием лазерной или дифракционной техники Фраунгофера. Наконец, в 1984 году появился термин «фазовой доплеровской анемометрии», а последние десять лет ознаменовались применением метода фазовой доплеровской анемометрии. Процесс изобретения, разработки и внедрения сложной методики измерения, как правило, довольно долгий и трудный. История с фазовым Доплером не является исключением.

Цель данной статьи – обзор истории ФДА.

Изобретение лазера примерно в 1960 году и его последующая коммерциализация сделали источники когерентного видимого света легкодоступными. Это способствовало развитию ряда дисциплин, включая использование лазеров в метрологии и диагностике потоков жидкости. Одним из семейств измерений, которое стало практически благодаря лазеру, является гетеродинная интерферометрия. Действительно, можно заметить использование разности фаз между парами того, что сегодня называется «доплеровскими вспышками», для оценки профилей и, следовательно, размеров отражающих поверхностей в статье Крейна [1]. Объектами Крейна [1] были зеркала, т. е. отражающие частицы очень большого или даже бесконечного радиуса. Он использовал двухлучевой интерферометр с «фазовым измерением» (разновидность интерферометра Тваймана-Грина) для измерения профиля. Интерферометр был автоматизирован с использованием частотного сдвига и камеры разделения изображения с апертурой 40 мкм, сканирующей активную область 2,5 см. В некотором смысле это было эквивалентно использованию матрицы детекторов для измерения разницы между положением поверхности эталонной сферы и поверхности реального сферического зеркала. Детекторная решетка позволяла провести одновременно измерения для нескольких точек зеркала. «Необработанные» данные содержали сдвинутые во времени гармонические сигналы, а разность фаз между сигналами была пропорциональна отклонению фактической поверхности от эталонной сферы/поверхности в каждой точке. Аналоговый фазовый детектор использовался для обеспечения выходного напряжения постоянного тока, пропорционального разности фаз или углу сдвига.

Работа Фармера [2] представляется первой успешной попыткой извлечь информацию о размере из сигналов LDV. Фармер [2] использовал тот факт, что видимость или глубина модуляции доплеровской вспышки от анемометра с двойным рассеянием связана с размером частиц. Разработано теоретическое выражение, основанное на дифракционном приближении для ближнепрямого рассеянного света [2]. Хотя метод видимости имел некоторые большие преимущества, включая одновременное измерение скорости и размера частиц, трудности с динамическим диапазоном размеров в конечном итоге ограничили его полезность. Тем не менее, эта работа стала важным предшественником ФДА.

Первые документы, непосредственно связанные с разработкой концепции измерений, известной сегодня как фазовый доплеровский метод, были написаны в 1975 году Дурстом и Заре [3, 4]. Для демонстрации своих идей авторы [2, 3] использовали относительно крупные миллиметровые металлические сферы и пузырьки, а также двухэлементный фотодиодный детектор, помещенный в зону рассеяния. Идея использования разности фаз для измерения размера и скорости частиц лежит в основе ФДА. Они получили сигналы от двух фотодиодов, которые указывают на разность фаз. Величина этой разности фаз зависит от радиуса кривизны отражающей поверхности и, следовательно, содержит информацию о размере, которую можно извлечь из сигналов двойных диодов.

Возрождение ФДА началось примерно в 1980 году и распространилось в нескольких местах по всей Европе и в США. Похоже, что после 1975 года следующим человеком, опубликовавшим новую информацию о методе ФДА, был Флогель [5] в своей дипломной работе в Бременском университете. Флогель был зачислен на физический факультет, но работал лаборантом под руководством профессора Баукхаге. Флогель [5] смог выполнить калибровку в эксперименте с использованием стеклянных сфер. Результаты определенно демонстрируют значительный разброс, а также некоторую степень систематической ошибки. Флогель объяснил проблемы влиянием несферических частиц и дефектов частиц на результаты. Эта работа была завершена в середине-конце 1981 года, а диссертация была принята в декабре 1981 года.

В то же время DISA (теперь DANTEC), крупный поставщик систем ЛДА, также проявил серьезный интерес к измерениям размеров. Доктор Бачало, который в то время работал в Spectron Development Labs, работал над методом видимости в дополнение к ряду других схем определения размера частиц. Бачало [6, 7] изобрел и разработал метод внеосевой видимости, и здесь также зародилась идея о том, что именно пространственный интервал между полосами является фундаментальной наблюдаемой величиной (в отличие от видимости).

Оптическая система с внеосевым обнаружением на 30 градусов была использована Бачало и его коллегами [8]. Получены результаты для разностей фаз между сигналами для двух пар детекторов, по сути, калибровочная кривая из работы [8]. Также использована геометрия трех щелевых апертур, используемых позади собирающей линзы [8]. Эта конфигурация, как по ориентации детектора, так и по внутренней конструкции, очень похожа на ту, которая обычно используется сегодня.

Помимо деятельности в Бремене и США, аналогичная работа велась в рамках совместного проекта Дании и Германии. Вклад DISA/DANTEC в истории ФДА уходит корнями во встречу в июне 1980 года между сотрудниками DISA и Hamburgische Schiffbau-Veruchsanstalt (HSVA). Интересным приложением для HSVA было определение размеров кавитационных пузырьков, и с DISA был начат совместный проект разработки, где Бучхаве заинтересовался системой определения размеров, дополняющей DISA ЛДА.

Конференция в Лиссабоне Баукхаге и Флогеля [9]. Команда DISA в составе Бучхаве, Кнуцена, Олльдага и Саффмана сыграла важную роль в разработке

ФДА. Первые трое являются изобретателями патента DISA [10]. Буххейв и Саффман разработали ФДА на основе четырех отдельных фотоумножителей (для решения проблемы неопределенности фазы  $2\pi$ ) и цифровых регистраторов переходных процессов. Прибор ФДА был продемонстрирован группе HSVА в ноябре 1983 г. [9]. Исследователи также использовали теорию Лоренца-Ми для расчета калибровочных кривых частичного разряда [10]. Saffman et al. [10] также сообщили о результатах дополнительного теоретического анализа и калибровочных исследований с использованием пузырьков на конференции по лазерной велосиметрии 1984 года в Лиссабоне.

Одной из наиболее качественных книг по развитию метода фазовой доплеровской анемометрии является книга Albrecht et al [11].

### *Заключение*

Фазовый доплеровский анемометр сыграл решающую роль в определении характеристик частиц и будет оставаться актуальным в течение некоторого времени. Как и в случае с большинством важных изобретений, разработка ФДА включала в себя последовательность взаимосвязанных достижений, происходящих более или менее одновременно в нескольких лабораториях. Важный вклад, критически важный для ФДА в том виде, в котором мы его знаем сегодня, был внесен рядом исследователей. Некоторые из этих ключевых вкладов показаны в табл. 1 вместе с источником и датой первого раскрытия информации в публичном документе или публикации. В 2024 году исполняется 50 лет двум наиболее важным из них.

### *Благодарности*

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

*Таблица 1*

Основные этапы при развитии метода ФДА

Основной вклад	Первая публикация
Концепция измерения размеров частиц как разница в фазе между сигналами с фотодетектора	Durst and Zare [3,4], 1975
Демонстрация измерения размеров частиц по разнице фаз между доплеровскими вспышками	Durst and Zare [3,4], 1975
Построение калибровочных соотношений $D = f(\text{разница фаз})$	Flogel [5], 1981
Калибровочные эксперименты, измерения размеров частиц	Flogel [5], 1981
Применение более двух фотодетекторов для расширения возможности работы приборов при переходе фазы через $2\pi$	Bachalo [8], 1983
Применение встроенных фотодетекторов в единой приемной системе, критически важной для практической реализации метода в измерительной системе	Bachalo [9], 1983
Применение теории Лоренца-Ми при разработке приборов	Saffman, Buchhave, and Tanger [10], 1984

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. R. Crane: Interference Phase Measurement. Appl. Opt. 8 (1969) 538–542.
2. W. M. Farmer: Measurement of Particle Size, Number Density, and Velocity Using a Laser Interferometer. Appl. Opt. 11 (1972) 2603–2612.
3. F. Durst, M. Zare: Laser Doppler Measurements in Two-phase Flows, Proc. LDA-Symposium Copenhagen 1975, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, (1976) pp. 403–429.
4. F. Durst, M. Zare: Laser Doppler Measurements in Two-phase Flows. Report SFB 80/TM/63, 46 pages, Sonderforschungsbereich 80, Universitat Karlsruhe, Germany, July 1975.
5. H. Flogel: Untersuchung von Teilchengeschwindigkeit und Teilchengrofle mit einem Laser-Doppler-Anemometer. Diplomarbeit im Studiengang Physik, Universitat Bremen, Bremen, Germany, October 1981.
6. W. D. Bachalo: Method for Measuring the Size and Velocity of Spheres by Dual-beam Light-scatter Interferometry. Appl. Opt. 19 (1980) 363–370.
7. W. D. Bachalo: Apparatus for Sizing Particles, Droplets, or the like with Laser Scattering. US Patent 4,329,054, filed 16 August 1979, issued 11 May 1982.
8. W. D. Bachalo: Project Status Report No. 2, NASA Lewis Contract 3-23684 (Analysis and Testing of a New Processing Method for Laser Light Scattering Interferometry), Aerometrics, Inc., 5 January 1983.
9. L. Bauckhage, H. H. Flogel: Simultaneous Measurement of Droplet Size and Velocity in Nozzle Sprays, pp. 18.1.1–18.1.6, in Proceedings of the 2nd International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon, 1984.
10. M. Saffman, P. Buchhave, H. Tanger: Simultaneous Measurement of Size, Concentration and Velocity of Spherical Particles by a Laser Doppler Method, pp. 85–103 in R. J. Adrian et al. (eds.): Laser Anemometry in Fluid Mechanics – II, Ladoan, Lisbon, 1986. Based on M. Saffman, P. Buchhave, H. Tanger: Simultaneous Measurement of Size, Concentration and Velocity of Spherical Particles by a Laser Doppler Method, pp. 8.1.1 – 18.1.6, in Proc. 2nd International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon, 1984.
11. H.-E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke, C. Tropea Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques. Springer. New York. 2003. 741 P.

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