



УДК 621.378

Н.М.Скорнякова, Б.С.Ринкевичюс

Московский энергетический институт (технический университет), Россия

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ МИКРОПОТОКОВ

Представлен обзор современных оптических методов диагностики микропотоков, описаны принципы действия, приведены оптические схемы измерительных систем и области применения.

ЛАЗЕРНАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ МИКРОСКОПИЯ, МИКРО АНЕМОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ, МИКРО ТЕНЕВОЙ ФОНОВЫЙ МЕТОД, ЛАЗЕРНАЯ МИКРО РЕФРАКТОГРАФИЯ, ЛАЗЕРНАЯ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

1. ВВЕДЕНИЕ. Микро потоки жидкости и газа играют все возрастающую роль в современной науке и технике. Исследования таких потоков вызывают большие трудности из-за невозможности применения контактных датчиков, типа термоанемометров. Только оптические и лазерные методы диагностики потоков могут поднять экспериментальные исследования на качественно новый уровень.

2. ЛАЗЕРНАЯ ДОПЛЕРОВСКАЯ МИКРОСКОПИЯ [1]. Наиболее совершенным оптическим методом измерения скорости микропотоков является доплеровский метод, в котором полностью реализуются преимущества лазерного излучения перед излучением обычных источников света. Высокая временная и пространственная когерентность лазерного излучения позволила создать новый метод измерения скорости потока, в котором информативным параметром, характеризующим скорость, является разность частот двух волн: рассеянной и опорной (схема с опорным пучком) или двух рассеянных (дифференциальная схема). В настоящее время наибольшее распространение получила дифференциальная схема, на основе которой разработаны лазерные доплеровские анемометры (ЛДА), позволяющая измерять одну, две и три проекции вектора скорости частиц, характеризующих скорость потока.

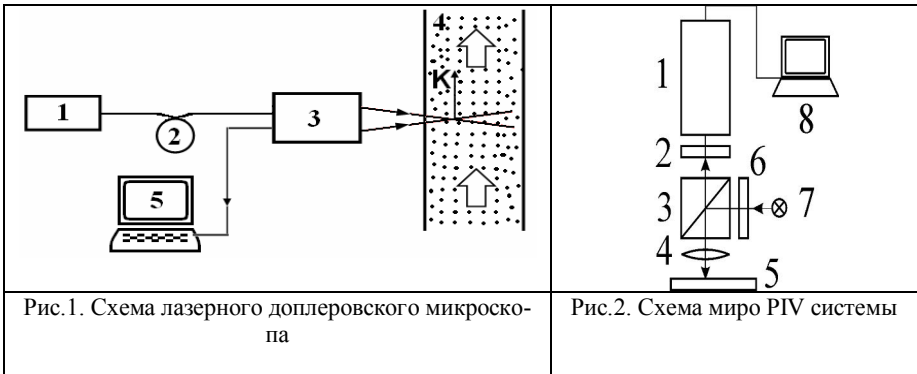
Принцип работы ЛДА основан на интерференции лазерных пучков. В области их пересечения образуется интерференционное поле. Движение малой частицы через такое поле приводит к изменению мощности рассеянного излучения. Поэтому при регистрации рассеянного излучения с помощью фотоприемника выходной сигнал изменяется во времени по закону

$$i(t) = i_0[1 + m \cos(\Omega_0 - \mathbf{K}u)t], \quad (1)$$

где i_0 – огибающая импульса фототока от одной частицы, m – коэффициент модуляции фототока, Ω_0 – разность частот зондирующих пучков, \mathbf{K} – вектор чувствительности схемы. В эксперименте измеряется частота $\Omega = |\Omega_0 - \mathbf{K}u|$, характеризующая величину и направление скорости потока.

Доплеровский метод обеспечивает большую локальность измерений, так как лазерные пучки можно сфокусировать в пятно, размеры которого составляют единицы микрометра. В настоящее время ЛДА выпускаются серийно с большим разнообразием конструкций и областей применения.

На рис. 1 показана блок-схема лазерного доплеровского микроскопа (ЛДМ), в которой излучение лазера 1 через световод 2 направляется в приемопередающий зонд 3, где формируются два пучка с различными частотами. Рассеянное на мелких частицах микропотока 4 назад излучение попадает в зонд 3 и преобразуется в электрический сигнал, который направляется в компьютерную систему обработки информации 5 для выдачи информации о параметрах потока. Для получения высокого пространственного разрешения в зонде 3 используются микрообъективы с большой апертурой. С помощью ЛДМ исследуются пристеночные течения с разрешением до 1 мкм [1].



3. ЛАЗЕРНАЯ МИКРО АНЕМОМЕТРИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ЧАСТИЦ. В отличие от локального доплеровского метода лазерная анемометрия по изображениям частиц (PIV-метод) является полевым методом, позволяющим получить информацию о скорости потока в выбранном сечении [2]. Здесь исследуемый поток, содержащий частицы, зондируется не узким лазерным пучком, а астигматическим, у которого ширина существенно превосходит его толщину. Такой пучок получается с помощью специальной оптической системы. Лазер работает в двухимпульсном режиме, интервал между короткими импульсами может варьироваться. Рассеянное частицами излучение регистрируется с помощью матричного фотоприемника, сигнал с

которого подается в компьютер. Используются специальные корреляционные алгоритмы обработки двух оптических изображений потока с частицами, которые позволяют получить информацию о поле скоростей.

В традиционной схеме PIV пространственное разрешение вдоль линии наблюдения рассеянного излучения определяется толщиной лазерной плоскости, которая составляет 1 – 5 мм. Для исследования микропотоков необходимо пространственное разрешение около одного микрометра. Такое разрешение можно обеспечить, если для регистрации изображения частиц использовать микрообъективы. В связи с этим оптическая схема микро-PIV строится обычно на базе микроскопа.

Первая работа, в которой была реализована микро PIV система, появилась лишь в 1998 году [4] и была реализована на базе эпифлуоресцентного микроскопа с цифровой записью изображений. В нем в качестве источника света использовалась ртутная лампа 7 со светофильтром 6 на длину волны 469 нм, микрообъектив 4 с числовой апертурой 1,4 и микроканальная ПЗС камера 1 с 512x512 пикселей и 12-ти битовым разрешением. Время экспозиции камеры составляло 2 мс, интервал между кадрами составлял 68,5 мс. Увеличение микроскопа составляло 100. Наблюдалась флуоресцентное излучение частиц на длине волны 509 нм, для чего использовался светофильтр 2 на эту длину волны в канале регистрации рассеянного излучения.

К частицам предъявляются два противоречивых требования. Во-первых, частицы должны быть достаточно малыми, чтобы отслеживать скорость потока, во вторых, частицы должны быть достаточно большими, чтобы уменьшать эффект броуновского движения. В качестве визуализирующих частиц использовались частицы полистирола диаметром 300 нм с плотностью 1,055, которые поглощали излучение на длине волны 469 нм и излучали за счет флуоресценции свет с длиной волны 509 нм.

Объектом исследования 5 являлась ячейка Hele-Show толщиной 170 мкм, заполненная деионизированной водой. Скорость потока составляла 50 мкм/с. Исследовался поток воды около цилиндра с эллиптическим сечением с диаметром 30 мкм. В поле зрения 120x120 мкм² было получено 900 векторов скорости. С использованием алгоритма обработки изображений можно получить пространственное разрешение 1,2x 1,2x1,5 мкм³.

4. ЛАЗЕРНАЯ МИКРОРЕФРАКТОГРАФИЯ [4]. Лазерная рефрактография является новым методом диагностики оптически неоднородных сред, основанным на зондировании потока жидкости структурированным лазерным излучением, цифровой регистрации рефрактограмм и ее компьютерной обработке с целью восстановления свойств среды. Применяется для исследования температурных полей в тонких пограничных слоях жидкости вокруг нагретых тел толщиной около одного миллиметра. Принципы лазерной

рефрактографии изложены в докладе [5], помещенном в данных трудах конференции.

5. ЛАЗЕРНАЯ МОДУЛЯЦИОННАЯ МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

[6]. Интерферометрический метод измерения параметров потоков газа и жидкости известен давно, однако только использование лазеров в качестве источников излучения позволило создать большое многообразие компьютерно-интерференционных систем, которые в настоящее время широко используются в диагностике и микропотоков жидкости и газа. Применяются, в основном, модуляционные интерферометрические системы, имеющие большую чувствительность к изменению разности фаз лазерных пучков, что позволяет измерять сверхмалые изменения толщины миллиметровой пленки жидкости на уровне 0,01 нм или показателя преломления воздушного потока в миллиметровом канале в восьмом знаке, что соответствует изменению давления на уровне десятых долей Паскаля, изменению температуры на величину 10^{-4} °С.

С помощью интерферометра регистрируется разность фаз двух интерферирующих лазерных пучков $\Delta\varphi$, которая зависит от изменения оптического пути

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda_0)(n\Delta l + l\Delta n), \quad (2)$$

где λ_0 – длина волны в вакууме, n – показатель преломления жидкости или газа, l – ширина канала, Δl – изменение ширины канала, Δn – изменение показателя преломления среды.

Если в эксперименте возможно отдельно измерить составляющие разности фаз, то при помощи лазерного интерферометра можно получить информацию об изменении геометрического пути Δl и показателя преломления Δn по соотношениям

$$\Delta l = (\Delta\varphi/2\pi)(\lambda_0/n), \quad \Delta n = (\Delta\varphi/2\pi)(\lambda_0/l). \quad (3)$$

Современные методы модуляционной интерферометрии позволяют измерять разность фаз $(\Delta\varphi/2\pi)$ на уровне 10^{-7} . Тогда при $\lambda_0 = 0,5$ мкм, $n = 1,33$, $l = 0,6$ мм имеем $\Delta l = 5 \cdot 10^{-14}$ мкм и $\Delta n = 10^{-10}$. Интерференционные методы нашли широкое применение в медицинских и биофизических исследованиях [7 – 9].

6. **МИКРО ТЕНЕВОЙ ФОНОВЫЙ МЕТОД [10].** Теневые методы и приборы в настоящее время широко используются в аэродинамическом эксперименте при исследовании обтекания сверхзвуковым потоком моделей летательных аппаратов. При исследовании потоков жидкости теневые приборы используются редко. В 1999 году немецким ученым Меером был предложен принцип нового дифференциального рефракционного метода исследования

оптически неоднородных сред, основанный на компьютерной регистрации двух изображений структурированного экрана: без исследуемого потока и при его наличии. Данный метод нашел применение для исследования различных газовых потоков, в том числе в полевых условиях. Применение данного метода для исследования микропотоков впервые было рассмотрено в работе [10]. На рис. 3 приведена оптическая схема установки, предназначенной для исследования эффекта Марангони с использованием микро теневого фонового метода. В установке используется источник некогерентного света 4 (лампа накаливания), который освещает структурированный экран 3. Пршедший свет направляется на структурированную стеклянную пластину 2 с углублениями, в которых находится испаряющаяся жидкость.

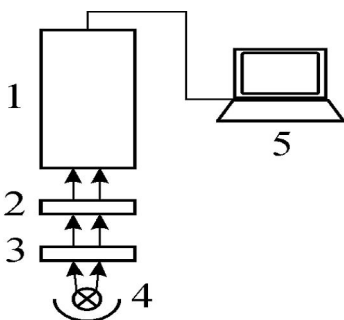


Рис.3. Схема установки микро ТФМ

Величина углублений составляла 0,1 мм. Пршедшее излучение микробиоъективом направляется на ПЗС видеокамеру 1. Полученные два изображения обрабатываются в компьютере 5 с помощью специальных программ для получения информации о процессе испарения жидкости. Различные области применения теневого фонового метода рассматриваются в докладе [11], помещенном в данном сборнике трудов.

7. БЛАГОДАРНОСТИ. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010)», проект 2.2.2.2/5691).

8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ринкевичюс Б.С. Лазерная диагностика потоков. – М.: Издательство МЭИ, 1990. 287 с.
2. Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle Image Velocimetry. Springer-Verlag Heidelberg, 1998.
3. Santiago J.G., Wereley S.T., Meinhart C. D., Beebe D. J., Adrian R. J. A particle image velocimetry system for microfluidics. Exp. Fluids 1998. Vol.25, 316-319
4. Евтихиева О.А., Расковская И. Л., Ринкевичюс Б. С.. Лазерная рефрактография. М.: Физматлит. 2008. 176 с.
5. Расковская И.Л., Евтихиева О.А., Ринкевичюс Б. С., Толкачев А.В., Есин М.В. Принципы лазерной рефрактографии. Настоящий сборник, С. 32-36.
6. Karasik A.Ya., Rinkevichius B.S., Zubov V.A. Laser Interferometry Principles./Ed.B.S.Rinkevichius. Moscow: MIR, Boca Raton: CRC Press. 448 p.

7. **Оболенский И.С., Приезжев А.В., Гурфинкель Ю.И.** Компьютерная капиллярскопия: Современное состояние, проблемы и перспективы. ОПИМ -2007. С.308-311.

8. **Гладкова Н.Д.** Оптическая когерентная томография в ряду методов медицинской визуализации.- Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2005–324 с.

9. **Тычинский В. П.** Динамическая фазовая микроскопия: возможен ли «диалог» с клеткой? //УФН, 2007. Т.177, №5, С.535- 552.

10. **Skornyakova N. M., Popova E. M., Rinkevichyus B. S., and Tolkachev A. V.** The investigation of heat transfer by Background Oriented Shlieren Method

11. **Скорнякова Н.М.** Применение ТФМ метода. См. настоящий сборник, с. 66-71.

N.M. Skornyakova, B.S. Rinkevichyus

Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Russia

OPTICAL METHODS OF MICROFLOWS DIAGNOSTIC

The overview of modern optical methods of microflow diagnostics are presented. The principles, optical schemes and areas of application are described.

LASER DOPLER MICROANEMOMETRY, PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY,
BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN METHOD, LASER
MICROREFRACTOGRAPHY, LASER MICROINTERFEROMETRY