

**МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА
И ЛОКАЛЬНОГО ГАЗСОДЕРЖАНИЯ
ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ****А. П. Белоусов¹, П. Я. Белоусов^{1,2}**

¹*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: abelousov@gorodok.net*

²*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
г. Новосибирск*

Теоретически и экспериментально обосновывается новый оптический метод, позволяющий находить размеры дисперсной фазы (газовых пузырьков в жидкости или капель жидкости в газе), освещаемой лазерным «ножом». Точность метода определяется разрешающей способностью систем регистрации изображения. В условиях тестового эксперимента погрешность определения размеров дисперсной фазы не превышала 1 %.

Введение. Физические процессы в двухфазных потоках в значительной степени зависят от концентрации и дисперсности примесной фазы [1]. Существующий метод PIV (Particle Image Velocimetry) [2] позволяет получать информацию как о поле вектора скорости, так и о пространственном распределении концентрации и дисперсности примесной фазы. Дисперсность твердых светорассеивающих примесей произвольной формы определяется их видимым размером при освещении импульсным источником света. Дисперсность пузырьков и капель не может быть измерена подобным образом, поскольку отдельные элементы границы раздела жидкость – газ являются не диффузными рассеивателями, а преломляющими элементами. При освещении плоской световой волной они формируют в проходящем и отраженном свете расходящиеся световые пучки с перетяжками в действительном и мнимом фокусах. Изображение фокальных пятен и их пространственное положение несут информацию о размере пузырьков и капель, однако ее можно использовать только при очень невысокой концентрации пузырьков и капель, что выходит за рамки данной работы. Отметим также, что существующий теневой метод не может быть эффективно использован в большинстве случаев из-за невозможности пространственно локализовать положение изучаемых объектов. В связи с этим, на наш взгляд, более перспективным методом измерения размеров и локальной концентрации пузырьков и капель может быть метод, основанный на измерении размера входного люка оптической схемы, включающей в себя сам пузырек либо каплю. Для точного измерения разме-

ра входного люка оптической системы необходимо иметь диффузно светящийся предмет, размеры которого превышают линейное поле зрения оптической системы. Если весь входной люк либо существенная часть его равномерно заполнены светом, то, измеряя радиус кривизны края люка, можно найти размер капель и пузырьков. Пространственная локализация измеряемых объектов в данном случае может быть определена положением источника освещения. Эта проблема весьма удачно решена и реализуется в оптической схеме РIV, где источник прямого и в ряде случаев диффузного освещения формируется в виде светового «ножа», толщина которого регулируется от долей миллиметра до нескольких миллиметров. С такой же точностью находятся координаты положения исследуемых капель и пузырьков. Направление наблюдения выбирается перпендикулярно плоскости ножа. Пространственное распределение частиц в области, освещенной тонким лазерным ножом, регистрируется камерой. Таким образом, определяются все три координаты исследуемых объектов.

Данная работа посвящена проблеме измерения размера движущихся в потоке круглых капель и пузырьков, освещенных ножевым импульсным источником света в направлении, перпендикулярном направлению наблюдения и регистрации.

Описание метода измерения геометрических характеристик дисперсной фазы. Для определения размера шаровидной дисперсной фазы предлагается использовать ее как отражающий либо преломляющий оптический элемент. В качестве светящегося объекта здесь применяется рассеивающая дисперсная фаза, расположенная на расстоянии, много большем, чем фокусное расстояние отражающей шаровой поверхности, что всегда реализуется при малой объемной концентрации примесной фазы.

Схема отражения света от пузырька круглой формы приведена на рис. 1. Для простоты на рисунке изображено сечение сферического пузырька по большой окружности. Плоскость сечения выбрана так, что лазерный нож направлен вдоль этой плоскости. Кроме того, плоскость сечения пузырька перпендикулярна плоскости лазерного ножа. Входной зрачок объектива распо-

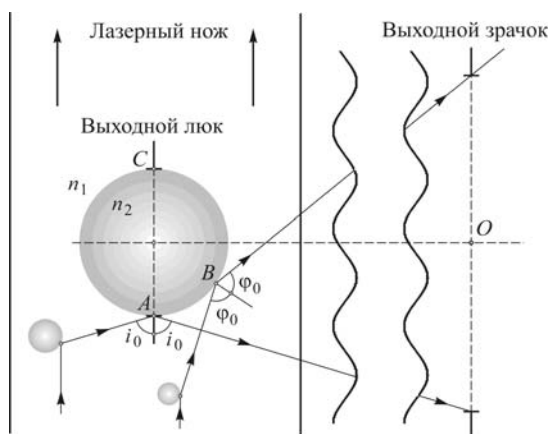


Рис. 1. Оптическая схема, используемая для формирования изображения выходного люка

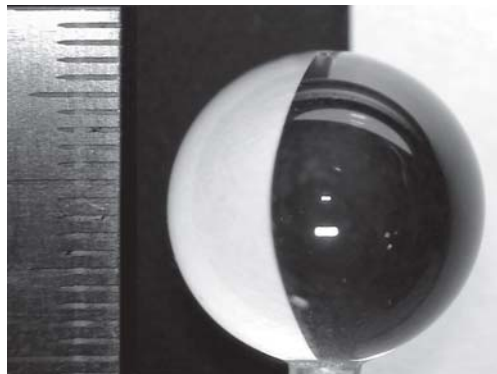


Рис. 2. Изображение калибровочной шкалы и полупространства, ограниченного выходным люком стеклянного шара

ложен на расстоянии, много большем, чем диаметр пузырька, и является выходным зрачком отражающей сферической поверхности. Выходной люк этой поверхности совпадает с большой окружностью пузырька, видимой из центра входного зрачка. Край выходного люка (точка A) освещается пучком лучей, падающих на отражающую сферическую поверхность в точку A под углом i . Если $i = i_0$, то отраженный в точке A луч попадает на край входного зрачка объектива. Таким образом, край выходного люка освещается пучком лучей, которые видятся из точки A под углом $i_0 < i < \pi/2$. Рассеивающие (отражающие и преломляющие) свет пузырьки, которые видны из точки B под углом $\varphi < \varphi_0$, освещают внутреннюю часть входного люка. Угол φ_0 , под которым видны рассеивающие пузырьки, является предельным для точки B вследствие ограниченности объема, занятого лазерным световым ножом, и габаритов светорассеивающего двухфазного потока. Согласно рис. 1 луч из точки B падает на край входного зрачка объектива. Если $\varphi > \varphi_0$, то отраженные лучи выходят за пределы зрачка. Дуга BC на приведенном сечении сферы освещается светом, отраженным пузырьками назад. Интенсивность отраженного светового потока для пузырьков и капель, размер которых много больше длины волны падающего излучения, в соответствии с формулами Френеля в десятки раз меньше интенсивности света, рассеянного вперед и освещающего дугу AB . Поэтому выходной люк изображается в виде серпа, обращенного выпуклой стороной к источнику света.

Аналогичная картина будет наблюдаться в случае освещения капли жидкости диффузным рассеивателем. Положение и размер выходного люка определяются пространственным положением и размером большой окружности шара.

Таким образом, рассеяние на дисперсной фазе и отражение от сферической поверхности раздела (либо преломление круглыми каплями) формируют серповидное изображение диффузного светящегося объема. Внешняя граница изображения светящегося объема определяется формой и размером люка оптической системы.

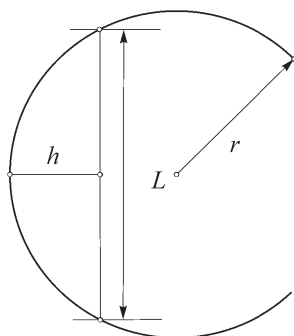


Рис. 3. Измерение радиуса изображения люка

L , мм	h , мм	r , мм	L , мм	h , мм	r , мм	L , мм	h , мм	r , мм
9,78	1,49	8,78	6,67	0,67	8,64	12,90	2,70	9,14
9,17	1,24	9,09	8,39	1,09	8,60	11,80	2,19	9,09
9,06	1,19	9,19	9,39	1,32	9,02	10,0	1,48	9,29
7,60	0,84	8,96	8,96	1,20	8,94	10,30	1,55	9,40
11,4	2,02	9,06	7,47	0,74	9,75	9,70	1,39	9,16
11,2	1,93	9,17	8,08	1,07	8,14	9,47	1,31	9,18
7,23	0,80	8,52	8,45	1,04	9,12	9,37	1,27	9,26
7,92	0,96	8,67	8,48	1,15	8,41	10,40	1,66	8,95
8,28	0,95	9,46	9,87	1,53	8,70	9,24	1,31	8,80
8,77	1,16	8,83	10,80	1,74	9,26	10,40	1,58	9,35
10,0	1,65	8,46	9,10	1,23	9,05	9,76	1,49	8,74
8,74	1,16	8,81	8,77	1,03	9,82	9,35	1,33	8,89
8,43	1,04	9,09	10,70	1,73	9,04	9,04	1,21	9,09
9,17	1,32	8,61	12,20	2,38	9,08	10,50	1,68	9,09

Для отражающей сферической оболочки и преломляющей сферической капли входной и выходной люки совпадают и линейное поле зрения определяется большим кругом сферической отражающей поверхности. Размер капель и пузырьков определяется измерением внешнего радиуса серповидного изображения окружающего пространства, заполненного рассеивающей свет средой.

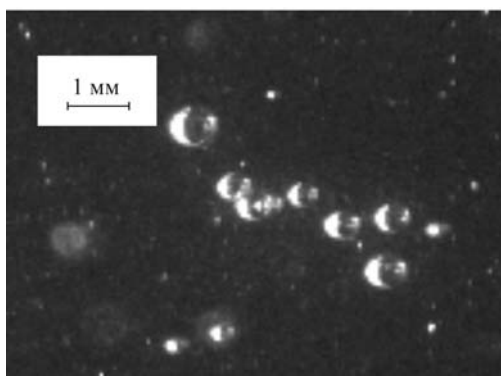


Рис. 4. Двухфазный светорассеивающий поток

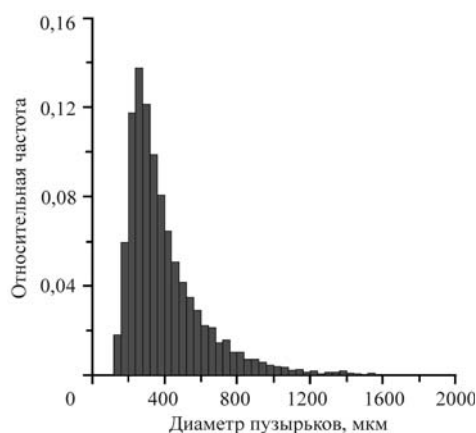


Рис. 5. Распределение пузырьков по диаметрам (~200 тыс. пузырьков)

Метод измерения геометрических характеристик больших капель был проверен на стеклянном шаре, который строил изображение большого черно-белого экрана, моделирующего светящееся полупространство (рис. 2). Изображение светлого полупространства, ограниченное люком, который совпадает с большим кругом, вводилось в компьютер и анализировалось. Определялся радиус полученного изображения люка согласно рис. 3:

$$r = \frac{(L/2)^2 + h^2}{2h},$$

где L – длина хорды, h – максимальное расстояние от хорды до границы изображения. Результаты измерений радиуса люка, среднее значение которого $\bar{r} = 8,993$ мм, приведены в таблице. Стандартное отклонение $\sigma = 0,33$ мм. Радиус стеклянного шара, измеренный микрометром, $r_0 = 9,005$ мм. Абсолютная погрешность измерения радиуса $\Delta r_0 = \bar{r} - r_0 \sim 12$ мкм, а относительная погрешность составляет величину $1,3 \cdot 10^{-3}$.

Апробация метода. Метод измерения геометрических характеристик был успешно применен при исследовании двухфазной газожидкостной осесимметричной затопленной импактной струи [1]. Дисперсную фазу представляли пузырьки различных диаметров, которые образовывались при инжекции воздуха в водяной поток. Изображение сечения двухфазного светорассеивающего потока приведено на рис. 4. Данный метод позволил получить гистограмму распределения воздушных пузырьков по диаметрам (рис. 5) и определить концентрацию газовой фазы в потоке при различных режимах течения (~3 %).

Заключение. Исследования, проведенные в данной работе, показывают, что предложенный метод дает возможность с высокой точностью ($\Delta r_0/r_0 \leq 1\%$) определять размеры крупных капель и пузырьков. Предполагается, что его можно применять для точного измерения диаметров пузырьков и капель меньших размеров. В описанном эксперименте использовалась цифровая камера Sony DSC-W17 с разрешением 7,2 Мпикселя, которая может регистрировать изображение максимального размера с относительной ошибкой дискретности менее 0,1 %. Использование панкратических объективов позволяет эффективно согласовывать размер объекта с максимальными линейными размерами изображения и применять в полной мере разрешающую способность цифровых камер. Анализ дисперсности потока с десятикратными вариациями радиуса капель и пузырьков сопряжен со снижением точности измерения размеров малых капель. Ошибка дискретизации при этом может достигать 1 %, а результирующая относительная погрешность измерения –

нескольких процентов. Отметим, что предложенный метод дает возможность регистрировать пузырьки и капли несферической формы. В данном случае большое сечение пузырька либо капли не будет кругом и соответственно не будут иметь круглую форму выходной люк и поле зрения системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белоусов А. П., Гейнц О. М., Маркович Д. М.** Исследование газожидкостной импактной струи методом PIV/LIF // Оптические методы исследования потоков: Тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. М.: МЭИ, 2005. С. 290.
2. **Raffel M., Willert C., Kompenhans Y.** Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Berlin: Springer-Verlag, 1998.

Поступила в редакцию 6 июня 2007 г.
