

УДК 535.8

А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов

*Институт теплофизики СО РАН, Россия, 630090, Новосибирск, академика Лаврентьева
пр., 1, E-mail: abelousov@ngs.ru*

ДОПЛЕРОВСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕГО ДИАМЕТРА КАПЕЛЬ И ПУЗЫРЬКОВ

АННОТАЦИЯ

Пузырьки и капли в газожидкостных потоках совершают колебания. Частота – известная функция диаметра. Обработка доплеровского сигнала позволяет получить информацию как о скорости движения, так и о размерах дисперсной фазы. В работе независимыми методами определены размеры пузырьков, прикрепленных к твердой поверхности. Погрешность измерения диаметра миллиметровых объектов не превышает 10%.

**ГАЗОЖИДКОСТНЫЕ ПОТОКИ, ДОПЛЕРОВСКАЯ ДИАГНОСТИКА, РАЗМЕР
ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ**

ВВЕДЕНИЕ

Лазерные доплеровские анемометры широко используются в исследованиях однофазных потоков. Для повышения точности в жидкость или газ добавляются трассеры. Применение доплеровской диагностики к газожидкостным потокам ограничено рядом факторов (прозрачность, сложность обработки сигнала и т. п.). Сферическая граница раздела газ/жидкость может совершать колебания на собственных частотах, зависящих от диаметра капли или пузырька. К доплеровской частоте, добавляются компоненты, смещенные на частоту собственных колебаний. Их число определяется отношением глубины частотной модуляции рассеянной волны к частоте собственных колебаний сферической границы раздела. Сложная структура доплеровского сигнала в газожидкостном потоке существенно затрудняет его обработку и снижает точность измерений. В то же время в сигнале содержится информация как о скорости, так и о размере пузырей и капель. Таким образом, корректная обработка позволяет получить дополнительную информацию о геометрических параметрах дисперсной фазы.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Известно [1], что потенциал скорости ψ в капле жидкости, при образовании стоячих волн, может быть представлен в виде

$$\psi = e^{-i\omega t} r^l P_l^m(\cos\theta) e^{im\varphi}, \quad (1)$$

где r – расстояние от оси, φ – азимутальный, а θ – полярный углы (сферическая система координат). Коэффициент l может принимать все целые положительные значения, а $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$. $P_l^m(\cos \theta)$ – присоединенная функция Лежандра. Частота ω , определяющая спектр колебательного процесса, находится подстановкой общего решения в уравнение Лапласа $\Delta \psi = 0$ при $r = R$,

$$\omega_l = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho R^3} l(l-1)(l+2)}, \quad (2)$$

где R – радиус капли, σ – коэффициент поверхностного натяжения, а ρ – плотность жидкости (формула Рэлея).

В эксперименте использовалась дифференциальная схема ЛДА, приведенная на рисунке 1. Система содержит He-Ne лазер 1, фазовую пластинку 2, поворотные призмы 3, 4, линзы 5 и 6, два акустооптических модулятора (АОМ) бегущей волны 7 и 9, взаимно ортогонально ориентированные, за которыми помещены линзы 8 и 10, зеркало с диафрагмами 11, составной объектив 12. На пути рассеянного пучка, ограниченного апертурой 12 и отраженного зеркалом 11 последовательно установлены поворотное зеркало 13, микрообъектив 14 и фотоприемник 15. Направления ультразвуковых волн в модуляторах взаимно ортогональны и соответствуют ориентации измеряемых компонент вектора скорости. Диафрагмы в зеркале 11 расположены во взаимно ортогональных плоскостях и ограничивают световые пучки, дифрагированные в модуляторах соответственно в нулевой и минус первых порядки дифракции. Фазовая пластинка 2 служит для согласования поляризации лазерного пучка с элементами оптической схемы. К фотоприемнику подключена система обработки 16 [2].

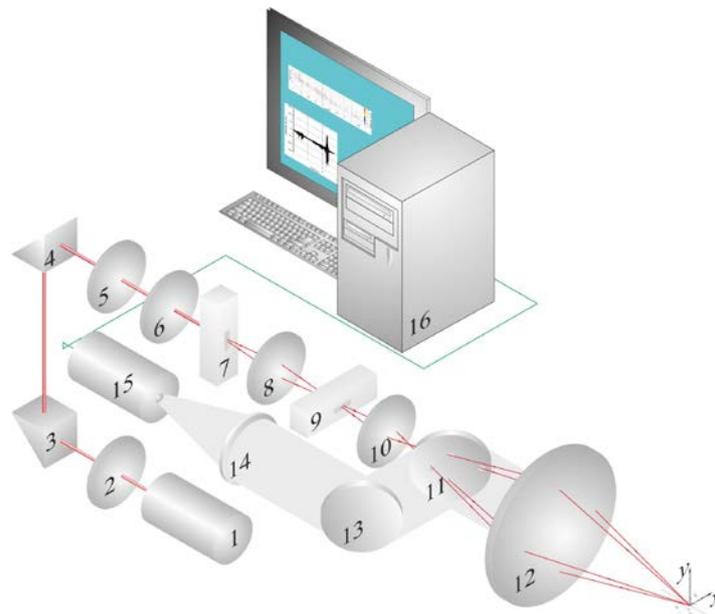


Рис. 1. Дифференциальная схема ЛДА.

Измерялась проекция вектора скорости, направленная вдоль разностного волнового вектора $\Delta \mathbf{k}$, падающих на каплю световых пучков. Величина этой компоненты может быть найдена из потенциала скорости колеблющейся капли в виде скалярного произведения градиента потенциала на единичный вектор, направленный по $\Delta \mathbf{k}$,

$$V_{\Delta\mathbf{k}} = (\nabla\Psi) \frac{\Delta\mathbf{k}}{|\Delta\mathbf{k}|}. \quad (3)$$

Частота доплеровского сигнала определяется произведением $V_{\Delta\mathbf{k}}$ на $|\Delta\mathbf{k}|$,

$$\omega_D = \nabla\Psi\Delta\mathbf{k} = Ae^{-i\sqrt{\frac{\sigma l(l-1)(l+2)}{\rho R^3}}t} \cdot \nabla \left[r^l \cdot P_l^m(\cos\theta) \cdot e^{im\varphi} \right] \cdot \Delta\mathbf{k}, \quad (4)$$

а

$$A \cdot \nabla \left[r^l \cdot P_l^m(\cos\theta) \cdot e^{im\varphi} \right] \cdot \Delta\mathbf{k} = A \cdot V_{\Delta\mathbf{k}}(r, \theta, \varphi). \quad (5)$$

Если колеблющаяся капля движется в потоке со скоростью \mathbf{V}_n , фототок на выходе фотоприемника имеет вид

$$\begin{aligned} i(t) &= A_0 \left\{ (\Delta\mathbf{k} \cdot \mathbf{V}_n)t + \varphi_0 + \sum_{l=2}^{\infty} B_l \left[A \cdot V_{\Delta\mathbf{k}}(t) \cdot \sin \left(\sqrt{\frac{\sigma l(l-1)(l+2)}{\rho R^3}}t + \varphi_l \right) \right] \right\} = \\ &= A_0 \cos \left\{ \omega_0 t + \varphi_0 + \sum_{l=2}^{\infty} m_l(t) \cdot \sin \left(\sqrt{\frac{\sigma l(l-1)(l+2)}{\rho R^3}}t + \varphi_l \right) \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, доплеровский сигнал при $m_l(t) \ll 1$ и $\varphi_0 = \varphi_l = 0$ может быть представлен как

$$\begin{aligned} i(t) &= \left\{ \cos \omega_0 t + \frac{1}{2} \sum_{l=2}^{\infty} m_l(t) \cdot \cos \left[\omega_0 + \sqrt{\frac{\sigma l(l-1)(l+2)}{\rho R^3}}t \right] - \right. \\ &\left. - \frac{1}{2} \sum_{l=2}^{\infty} m_l(t) \cdot \cos \left[\omega_0 - \sqrt{\frac{\sigma l(l-1)(l+2)}{\rho R^3}}t \right] \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Из полученного выражения следует, что в сигнале могут присутствовать все частоты, не запрещенные формулой Рэля. Каждая из гармоник имеет свою амплитуду $m_l(t)$. При больших значениях $m_l(t)$ $i(t)$ усложняется. Для колебания на отдельной частоте ω_l доплеровский сигнал принимает вид

$$\begin{aligned} i(t) &= A_0 \left\{ J_0(m_l) \cos \omega_0 t + J_1(m_l) \left[\cos(\omega_0 + \omega_l)t - \cos(\omega_0 - \omega_l)t \right] + \right. \\ &+ J_2(m_l) \left[\cos(\omega_0 + 2\omega_l)t + \cos(\omega_0 - 2\omega_l)t \right] + \\ &\left. + J_3(m_l) \left[\cos(\omega_0 + 3\omega_l)t - \cos(\omega_0 - 3\omega_l)t \right] + \dots + \text{и т. д.} \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь J_n – функция Бесселя порядка n . Из формулы видно, что в доплеровском сигнале кроме частот, определяемых формулой Рэля (2), могут присутствовать гармоники этих частот, которые располагаются на частотной шкале симметрично доплеровской частоте, соответствующей скорости капли в потоке.

ИЗМЕРЕНИЕ ДИАМЕТРОВ ПУЗЫРЕЙ

Согласно [3] решение уравнения Лапласа для пузырьков и капель аналогичны. Таким образом, формула (2) применима и к пузырькам. В работе использовался сосуд с линейкой, заполненный водой. Со временем на внутренних поверхностях оседали пузыри. Сосуд перемещался в вертикальном направлении с помощью координатного стола. Оптический блок ЛДА переключался в режим измерения горизонтальной компоненты. Сигнал с выхода ФЭУ анализировался системой 16 (см. рис. 1). На рис. 2 приведено изображение линейки, погруженной в сосуд с водой. На поверхности линейки наблюдаются осажденные пузыри газа. Диаметры пузырей на изображении, измеренные методом [4], варьируются в диапазоне 0,5 – 1,5 мм. Результаты приведены в таблице 1. $D_{cp} = 0,932$ мм.

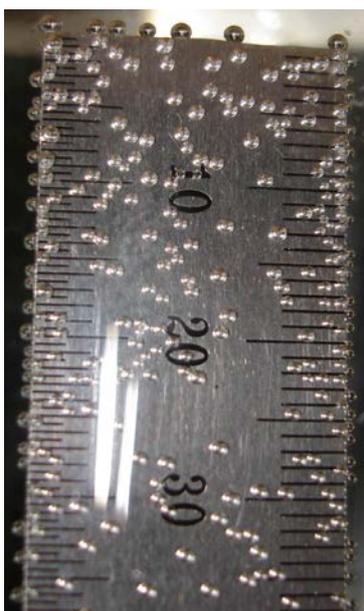


Рис. 2. Изображение линейки с пузырьками газа.

Поскольку пузыри на линейке не меняли своего местоположения, можно полагать, что при движении всей системы в вертикальном направлении на поверхности пузырей возбуждались стоячие волны Рэлея с узлами в месте контакта с твердой поверхностью. Для нулевой горизонтальной компоненты скорости линейки ($\omega_0 = 0$) в доплеровском сигнале присутствуют только частоты, обусловленные виброскоростями, связанными с Рэлеевскими колебаниями элементов поверхности пузыря (7), (8). В случае $\omega_0 \neq 0$ присутствующие в спектре компоненты не могут быть однозначно идентифицированы с колебательными компонентами, принадлежащими какому-то определенному значению l .

Таблица 1.

D , мм	1,18	0,74	0,79	0,75	0,89	1,17	0,96	0,85	1,16	0,83	1,0	0,92	0,94
	1,12	0,67	0,97	0,69	0,91	0,89	0,97	1,11	0,89	0,79	0,97	1,03	1,05

Результаты обработки доплеровского сигнала для $l = 2$ с использованием формулы Рэлея $D = 49,04 / f^{2/3}$ приведены в таблице 2. Среднее значение диаметра $D_{cp} = 0,915$ мм.

Таблица 2.

f , кГц	0,42	0,6	0,23	0,35	0,285	0,41	0,3	0,38
D , мм	0,856	0,675	1,28	0,967	1,108	0,87	1,07	0,915
f , кГц	0,215	0,252	1,27	0,447	0,46	0,7	0,38	

<i>D</i> , мм	1,34	1,2	0,41	0,82	0,806	0,61	0,915	
---------------	------	-----	------	------	-------	------	-------	--

Различие между средними диаметрами, полученными различными методами – 1,8%. Погрешность отдельного измерения в 4 – 5 раз выше. Различие в количестве измерений связано с высокой зашумленностью доплеровского сигнала от пузырей, пересекающих зондирующий объем не оптимально. Таким образом, для миллиметрового пузыря погрешность определения диаметра при малых l не превышает 10 – 15%. Это связано с малым временем существования доплеровского сигнала.

Точность определения диаметра пузырей может быть значительно увеличена, если использовать колебательные частоты с индексами модуляции $l > 2$. Погрешность измерения частоты спектральной компоненты Δf зависит от длительности сигнала и свойств оптико-электронной системы. Для однозначной идентификации принадлежности измеренной частоты сигнала к той или иной дискретной зависимости необходимо выполнение условия $\Delta f \ll f(l+1) - f(l)$. Если шаг дискретности равен единице, соотношение принимает вид $\Delta f < f'(l)$. Таким образом, для эффективной работы метода необходимо соблюдение условия

$$\Delta f \ll \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sigma l}{\rho R^3}} \left[\sqrt{(l+1)(l+3)} - \sqrt{(l-1)(l+2)} \right].$$

Относительная погрешность измерения частоты спектральных компонент доплеровского сигнала $\Delta f/f$ не должна превышать

$$\frac{\Delta f}{f} \ll \sqrt{\frac{(l+1)(l+3)}{(l-1)(l+2)}} - 1 \xrightarrow{l \gg 1} \frac{3}{2l}.$$

В случае нарушения данного соотношения диаметр пузырька определить невозможно.

Диаметр пузырька определяется по спектру частот колебаний. Погрешность измерения зависит от частоты и длительности сигнала. В связи с этим, оптимизация теоретической кривой по минимуму отклонения от экспериментальных значений частот колебаний эффективна для интервала значений $2 \ll l \ll 3f/2\Delta f$. Качественные оценки показывают, что значения $l \ll 150$ соответствуют относительной погрешности 1%, а $l \ll 1500$ – 0,1%.

На рис. 3. приведена зависимость частоты колебаний газового пузыря диаметром 1,37 мм (см. табл. 2), от параметра l . Спектр колебаний простирается до ультразвукового диапазона, соответствующего индексу модуляции $l > 60$.

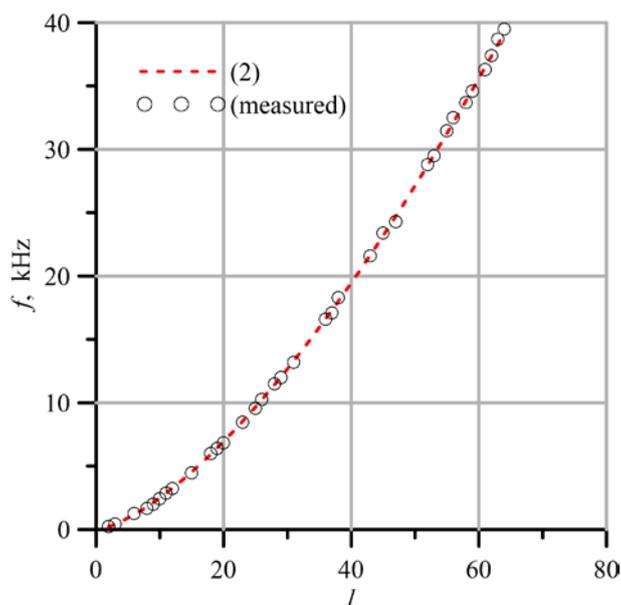


Рис. 3. Зависимость частоты сфероидальных колебаний пузыря от числового индекса l . Минимальная частота колебаний для $l = 2$ составляет величину 215 Гц. Диаметр пузыря 1,37 мм.

Зависимость от l относительного отклонения наблюдаемой и рассчитанной частот колебаний пузыря показана на рис. 4. Видно, что для $l > 10$, данная величина не превышает 2%. При уменьшении l отклонение возрастает.

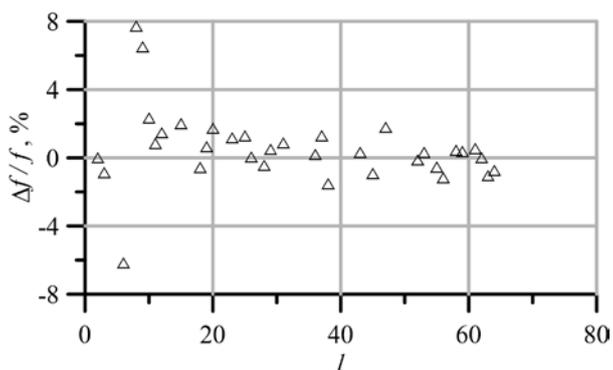


Рис. 4. Относительное отклонение наблюдаемой частоты колебаний пузыря (в процентах) от частоты, рассчитанной по формуле (2).

Вариации расчетного значения диаметра (2) приводят к вариациям величины Δf . Таким образом, минимизируя среднее значение отклонений для различных l , можно снизить погрешность измерения диаметра пузыря. В частности, оценка диаметра (0,967 мм) для $f = 0,35$ кГц из таблицы 2 при $l = 2$ завышает Δf .

Графики зависимости $(\Delta f / f) \cdot 100\%$ (l): а) $f = 0,344$ кГц и б) 0,35 кГц представлены на рис. 5(а, б).

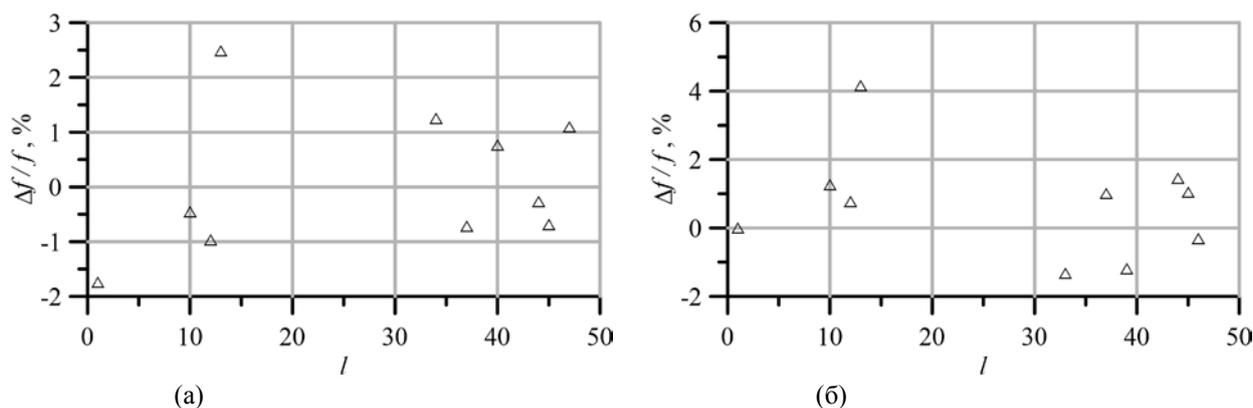


Рис. 5. Зависимость $(\Delta f/f) \cdot 100\%$ (l):

а) $f = 0,344$ кГц, $D = 0,99$ мм, среднее отклонение 0,077%, стандартное – 1,28 %.

б) $f = 0,35$ кГц, $D = 0,967$ мм, среднее отклонение 1,11% , стандартное – 1,57 %.

Видно, что погрешность измерения частоты с низким индексом колебания l , приводит к большим ошибками определения теоретической зависимости. Оптимизация теоретической зависимости $\omega(l)$ по минимуму среднего и стандартного отклонения от эмпирических значений привела к 3,2% увеличению диаметра пузыря для $f = 0.35$ кГц. Таким образом, оценка диаметра по оптимальному теоретическому ряду частот колебаний представляется более надежной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показало, что предложенный метод позволяет определять диаметры крупных пузырей с высокой точностью. Информация о диаметре пузырей поступает одновременно с информацией о скорости потока. Отсутствует необходимость изменения оптической схемы (фазовая доплеровская анемометрия [5]). Нет принципиальных ограничений размеров исследуемых объектов. Ввиду существенного различия скоростей непрерывной и дисперсной фаз в ряде газожидкостных потоков, одновременное измерение скорости и диаметра пузырей очень востребовано [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. Т.6, Москва, «Наука», 1988.
2. Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н., Меледин В. Г. и др. Лазерный доплеровский анемометр с адаптивной временной селекцией и визуализацией вектора скорости. Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1990. – Вып. 4, С. 24-28.
3. Lamb H. Hydrodynamics. UK: Cambridge University Press.
4. Белоусов А. П., Белоусов П. Я. Метод измерения дисперсного состава и локального газосодержания газожидкостных потоков. Автометрия № 2, Т. 44, С. 50 – 55, 2008.
5. Soo S. L. Instrumentation for fluid-particle flow. Park Ridge, NJ: Noyes Publications; Norwich, NY: William Andrew Pub, 1999, p. 412.
6. Белоусов А. П. Оптическая диагностика многофазных потоков: учеб. пособие / А. П. Белоусов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 227 с.

A.P. Belousov, P. Ya. Belousov

*Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Russia,
630090, Novosibirsk, Akademika Lavrent'eva pr., 1, E-mail: abelousov@ngs.ru*

DOPPLER DROPLET/BUBBLE MEAN DIAMETER SIZING METHOD

Bubbles and drops oscillate in two-phase flows. Frequency is known function of diameter. The Doppler signal processing provides information about velocity and size of a dispersed phase. The sizes of the attached to a solid surface bubbles are measured by independent methods. The measurement accuracy of object diameter is within 10%.

GAS-LIQUID FLOWS, DOPPLER DIAGNOSTICS, DISPERSED PHASE SIZING