

УДК 535.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ И РАЗМЕРА ПУЗЫРЬКОВ В ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКАХ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО АНЕМОМЕТРА

А. П. Белоусов^{1,2}, П. Я. Белоусов^{1,2}, Л. А. Борыняк²

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: abelousov@ngs.ru

Зарегистрированы собственные колебания сферической поверхности раздела газа и жидкости в пузырьке. Показана возможность измерения геометрических параметров покоящихся и движущихся частиц дисперсной фазы с помощью лазерного доплеровского анемометра. Разработан метод одновременного определения размера и скорости пузырька или капли в двухфазном потоке. Проведено сравнение средних размеров группы пузырьков, закрепившихся на линейке, полученных двумя независимыми методами: анализом изображения и обработкой доплеровского сигнала, содержащего информацию о собственных колебаниях сферической границы раздела сред. Подтверждена возможность использования лазерного доплеровского анемометра для одновременного измерения скорости и размера пузырьков или капель в двухфазном потоке.

Ключевые слова: оптическая диагностика, лазерные доплеровские системы, газовые пузырьки в жидкости, собственные колебания сферической границы раздела, газожидкостные потоки.

Введение. Оптимизация систем теплообмена, энергетических установок, двигателей внутреннего сгорания, биологических, химических и ядерных реакторов требует экспериментальной информации о структуре двухфазных пузырьковых и газочапельных потоков. Известны работы по адаптации лазерных доплеровских анемометров (ЛДА) к экспериментальному исследованию таких потоков [1–3].

В ряде случаев [3] пузырьки и капли не следуют потоку, что приводит к усложнению доплеровского сигнала ввиду различия скоростей движения фаз. Динамика поверхности пузырька, акустические колебания среды приводят к появлению дополнительных спектральных компонент [4] и затрудняют обработку сигнала. С другой стороны, сферическая граница раздела между газом и жидкостью совершает колебания на собственных частотах [5], определяемых формулой Рэлея. В доплеровский сигнал добавляется информация о модах колебания пузырька (капли) [6, 7], что служит основой для измерения скорости и размера исследуемого объекта.

Цель данной работы — представить доплеровский метод одновременного определения размера и скорости пузырьков в двухфазных газожидкостных потоках, обладающий увеличенным динамическим диапазоном и не требующий введения дополнительных фотоприёмных устройств по сравнению с фазовыми доплеровскими системами.

Метод измерения скорости и размера пузырьков или капель в двухфазных потоках. Потенциал скорости колебаний поверхности капли жидкости для стоячих волн может быть представлен в виде [5]

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

Здесь r , φ и θ — сферические координаты точки на поверхности капли. Целые числа l и m характеризуют номера и типы колебательных мод капли, которые могут принимать значения $l = 2, 3, \dots$ и $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm l$; $P_l^m(\cos \theta)$ — присоединённые функции Лежандра. Частота ω_l , определяющая спектр колебательного процесса капли, находится подстановкой общего решения в уравнение Лапласа $\Delta\psi = 0$. Частота колебаний поверхности капли определяется формулой Рэлея

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

где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, ρ — плотность жидкости, R — радиус капли. Однокомпонентный ЛДА с дифференциальной оптической схемой [8] позволяет измерять проекцию вектора скорости точек поверхности колеблющейся капли, направленную вдоль разностного волнового вектора $\Delta\mathbf{k}$ падающих на каплю световых пучков [9]. Величина этой компоненты вычисляется из выражения для скалярного произведения градиента потенциала на единичный вектор, ориентированный по $\Delta\mathbf{k}$:

$$V_{\Delta\mathbf{k}} = A(\nabla\psi) \frac{\Delta\mathbf{k}}{|\Delta\mathbf{k}|} = A\nabla[e^{-i\omega t} r^l P_l^m(\cos \theta) e^{im\varphi}] \frac{\Delta\mathbf{k}}{|\Delta\mathbf{k}|}, \quad (3)$$

где A — размерный коэффициент, характеризующий амплитуду колебаний. Доплеровский сдвиг частоты сигнала определяется произведением $V_{\Delta\mathbf{k}}|\Delta\mathbf{k}|$ [9]:

$$V_{\Delta\mathbf{k}}|\Delta\mathbf{k}| = \nabla\psi\Delta\mathbf{k} = A e^{-i\sqrt{\frac{\sigma l(l-1)(l+2)}{\rho R^3}} t} \nabla[r^l P_l^m(\cos \theta) e^{im\varphi}] \Delta\mathbf{k}. \quad (4)$$

Если колеблющаяся капля движется в потоке со скоростью \mathbf{V}_n , то фототок на выходе фотоприёмника [9]

$$i(t) = A_0 \cos \left\{ \omega_D t + \varphi_0 + \sum_{l=2}^{\infty} m_l(t) \sin \left(\sqrt{\frac{\sigma l(l-1)(l+2)}{\rho R^3}} t + \varphi_l \right) \right\}, \quad (5)$$

где A_0 — амплитуда фототока, $m_l(t)$ — амплитуда рэлеевской колебательной моды, ω_D — доплеровский сдвиг частоты, обусловленный скоростью движения пузырька. При условиях $m_l(t) \ll 1$, φ_0 и $\varphi_l = 0$ выражение (5) для фототока преобразуется к виду

$$i(t) = A_0 \left\{ \cos \omega_D t + \frac{1}{2} \sum_{l=2}^{\infty} m_l(t) \cos \left[\omega_D + \sqrt{\frac{\sigma l(l-1)(l+2)}{\rho R^3}} \right] t - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \sum_{l=2}^{\infty} m_l(t) \cos \left[\omega_D - \sqrt{\frac{\sigma l(l-1)(l+2)}{\rho R^3}} \right] t \right\}. \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что в сигнале присутствуют частоты $\omega_D \pm \omega_l$. Каждая из гармоник имеет свою амплитуду $m_l(t)$. При больших значениях $m_l(t)$ выражение для фототока (6) $i(t)$ усложняется. На отдельной частоте ω_l доплеровский сигнал принимает вид

$$i(t) = A_0 \{ J_0(m_l) \cos \omega_D t + J_1(m_l) [\cos(\omega_D + \omega_l)t - \cos(\omega_D - \omega_l)t] +$$

$$\begin{aligned}
 &+ J_2(m_l)[\cos(\omega_D + 2\omega_l)t + \cos(\omega_D - 2\omega_l)t] + \\
 &+ J_3(m_l)[\cos(\omega_D + 3\omega_l)t - \cos(\omega_D - 3\omega_l)t] + \dots\}, \tag{7}
 \end{aligned}$$

где ω_l определяется согласно (2), а J_n — функция Бесселя порядка n . Из выражения (7) следует, что в спектре сигнала содержатся гармоники с частотами, равными суммам, разностям доплеровской частоты и частот собственных колебаний (2). Формула (2) остаётся справедливой и для пузырьков газа в жидкости ввиду идентичности условий на границе раздела фаз [5].

Экспериментальные результаты. В первом тестовом эксперименте измерялся диаметр неподвижных газовых пузырьков, прикрепившихся к линейке (рис. 1). Для $l = 2$ формула (2) принимает вид

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho R^3}},$$

откуда следует, что

$$d = 2R = \sqrt[3]{\frac{16\sigma}{\pi^2 \rho f_2^2}} \approx \frac{49}{f_2^{2/3}} \text{ (мм)}. \tag{8}$$

Для воды ($\sigma = 72,7 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $\rho = 1000$ кг/м³) расчётный диаметр равен $49/f_2^{2/3}$ мм. Перемещение линейки осуществлялось в вертикальном направлении, в то время как ЛДА фиксировал горизонтальную компоненту скорости. Последовательно измерялись частоты собственных колебаний покоящихся пузырьков. На рис. 1 представлена спектрограмма сигнала ЛДА, сформированного одним из пузырьков. Диаметр, соответствующий максимуму спектральной мощности, равен 0,7 мм. Определение размера с использованием метода диффузного освещения [10] и масштабных делений линейки приводит к такому же результату. Средний диаметр, рассчитанный согласно (8) по результатам 15 измерений, $d_{\text{ср}} \approx 0,9$ мм. Анализ изображения по 26 измерениям показал, что $d_{\text{ср}}$ также порядка 0,9 мм. При цифровой обработке доплеровского сигнала использовались следующие параметры: частота дискретизации 96 кГц, ширина окна фурье-преобразования 16384.

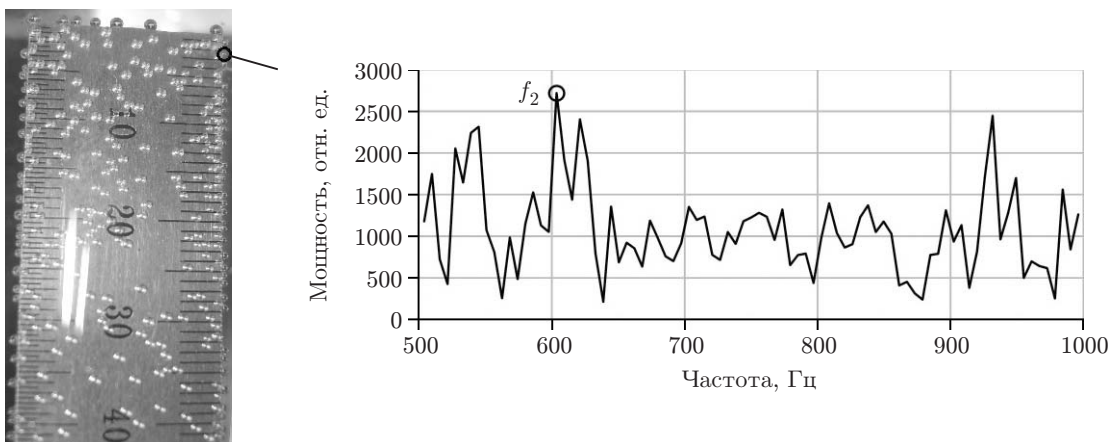


Рис. 1

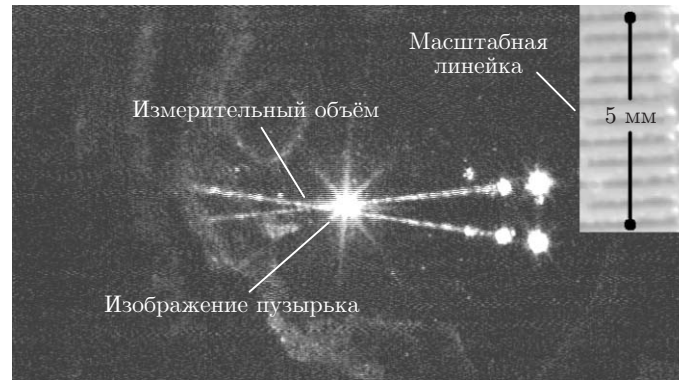


Рис. 2

Во втором эксперименте осуществлялась синхронная запись доплеровского сигнала, создаваемого пузырьком, и изображения измерительного объёма. Перед проведением эксперимента в область измерения помещалась линейка, необходимая для определения масштабного коэффициента. Параметры регистрирующей аппаратуры: размер изображения 720×576 точек, размер точки на изображении 72 мкм, частота кадров 25 кадр/с, частота дискретизации доплеровского сигнала 44,1 кГц, ширина окна фурье-преобразования 512. На рис. 2 приведено изображение пузырька вблизи измерительного объёма. Согласно [10] размер пузырька составляет $d = 0,65$ мм. На спектре сигнала ЛДА (рис. 3) хорошо видны три максимума, средний из которых соответствует доплеровской частоте $f_D = \omega_D/2\pi \approx 4565$ Гц, правее и левее — сателлиты, определяемые частотой Рэля (2):

$$\begin{cases} f_D - f_2 \approx 3969 \text{ Гц}, \\ f_D + f_2 \approx 5340 \text{ Гц}. \end{cases}$$

Рассчитывая частоты f_2 и проводя осреднение, получим $f_2 \approx 690$ Гц. Из выражения (8) $d \approx 0,63$ мм. Измеряемая компонента скорости пузырька в потоке

$$v_{\text{п}} = \frac{2\pi f_D}{|\Delta \mathbf{k}|} = \frac{4565 \text{ Гц}}{140 \cdot 10^3 \text{ Гц}/(\text{м}/\text{с})} \approx 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}/\text{с},$$

где $|\Delta \mathbf{k}|/2\pi = 140 \cdot 10^3 \text{ Гц}/(\text{м}/\text{с})$ для используемой дифференциальной схемы ЛДА [8].

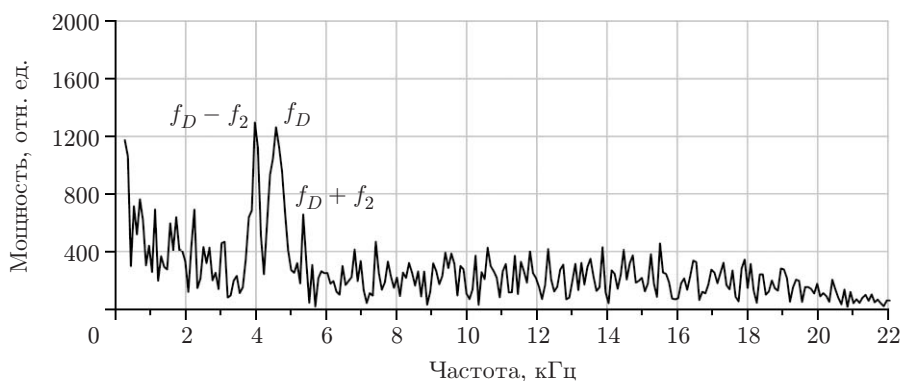


Рис. 3

Заключение. Впервые предложен и продемонстрирован метод одновременного измерения скорости и размера пузырьков в двухфазных потоках с помощью стандартного ЛДА. Разработан оригинальный алгоритм выделения из доплеровского сигнала информации о скорости и размере пузырьков. Результаты согласуются с данными, полученными в тестовых экспериментах при анализе изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Xu R.** Particle Characterization: Light Scattering Methods. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002. 397 p.
2. **Instrumentation** for Fluid-Particle Flow /Ed. S. L. Soo. Park Ridge, USA: Noyes Publications, 1999. 411 p.
3. **Белоусов А. П.** Оптическая диагностика многофазных потоков: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 227 с.
4. **Белоусов А. П., Белоусов П. Я., Борыняк Л. А.** Доплеровская диагностика дисперсной фазы в газожидкостных потоках // Науч. вестн. НГТУ. 2013. № 4(53). С. 63–69.
5. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Гидродинамика. Теоретическая физика. М.: Наука, 1986. Т. VI. 736 с.
6. **Groen J. S., Mudde R. F., Van Den Akker H. E. A.** On the application of LDA to bubbly flow in the wobbling regime // Exp. in Fluids. 1999. **27**, N 5. P. 435–449.
7. **Argo IV T. F., Wilson P. S.** Measurement of the resonance frequency of single bubbles using a laser Doppler vibrometer // JASA. 2008. **123**, N 6. P. EL121–EL125.
8. **Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н., Меледин В. Г., Павлов В. А.** Лазерный доплеровский анемометр с временной селекцией ортогональных компонент вектора скорости // Автометрия. 1988. № 2. С. 43–49.
9. **Дубнищев Ю. Н., Ринкевичюс Б. С.** Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 304 с.
10. **Белоусов А. П., Белоусов П. Я.** Метод измерения дисперсного состава и локального газосодержания газожидкостных потоков // Автометрия. 2008. **44**, № 2. С. 50–55.

Поступила в редакцию 8 декабря 2014 г.
