

*Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 26 июня—30 июня 2017 г.*

УДК 535.31:681.7.001

И.Л. Расковская

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: raskovskail@mail.ru*

**О ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
ЛОКАЛЬНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТИ
НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ СХЕМЫ ЛДА**

АННОТАЦИЯ

Показано, что в ультразвуковом поле в жидкости принципиально возможно косвенное измерение колебательной скорости частицы и соответствующего локального избыточного давления на основе регистрации рассеянного микрочастицами лазерного излучения при использовании интерференционной схемы лазерного доплеровского анемометра (ЛДА). Рассеянное излучение представляет собой частотно-модулированный сигнал, информативным параметром которого является девиация частоты на второй гармонике акустического поля.

**УЛЬТРАЗВУК В ЖИДКОСТИ, ЛАЗЕРНАЯ ДОППЛЕРОВСКАЯ АНЕМОМЕТРИЯ,
ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ, ЛОКАЛЬНОЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ

Работы по исследованию возможностей создания лазерного метода измерения акустического давления на основе ЛДА [1-5] путем нахождения колебательной скорости локализованных в исследуемой среде частиц, были начаты в 1991 году по инициативе и при поддержке ВНИИФТРИ [6] и в дальнейшем продолжены при частичной поддержке международным грантом INTAS-93-0344-ext. Однако, в ходе исследований было выявлено, что при распространении лазерных пучков в акустическом поле возникает неконтролируемый фазовый набег, приводящий к колебанию интерференционных полос в измерительном объеме и появлению эффекта «кажущейся скорости частицы» [7-10]. Дальнейшие работы [10-18] позволили для интерференционной схемы ЛДА оценить и исследовать для разных условий погрешность измерения локального акустического давления, обусловленную указанным акустооптическим эффектом. Полученные значения погрешностей «истинной скорости частицы», измеряемой на основе определения девиации частоты рассеянного лазерного излучения на первой гармонике акустических колебаний, составляли сотни процентов, что заставило отказаться от метода измерения локального акустического давления в жидкости на основе интерференционной схемы ЛДА. Тем не менее, как будет показано далее, измерение коэффициента частотной модуляции рассеянного лазерного излучения на второй гармонике акустического поля позволяет избежать влияния акустооптического эффекта, имеющего место на основной частоте ультразвука. Для выяснения основных количественных соотношений между упомянутыми выше величинами

рассмотрим более подробно связь между оптическими и механическими характеристиками жидкой среды при наличии акустического поля.

СВЯЗЬ МЕЖДУ ОПТИЧЕСКИМИ И МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЖИДКОЙ СРЕДЫ ПРИ НАЛИЧИИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Под действием АП плотность среды меняется во времени и в пространстве, соответственно, изменяется её показатель преломления, причем последний зависит как от параметров АП, так и от акустооптических свойств среды [19]. Рассмотрим, как связан показатель преломления среды с параметрами акустической волны. Пусть в среде при $z > 0$ вдоль оси X распространяется плоская акустическая волна (рис.1а). Изменение текущей координаты элементарного объема среды χ в этом случае описывается уравнением:

$$\chi(x, t) = x - A \cos(\Omega_a t - K_a x), \quad (1)$$

а скорость колебательного движения элементарного объема

$$v(x, t) = V \sin(\Omega_a t - K_a x), \quad (2)$$

где $A = \frac{V}{\Omega_a}$ – амплитуда колебаний, V – амплитуда колебательной скорости, Ω_a – акустическая частота, $K_a = \frac{2\pi}{\Lambda_a}$ – модуль волнового вектора, $\Lambda_a = \frac{c_a}{\Omega_a}$ – длина акустической волны, c_a – скорость звука в среде. Заметим, что соотношения (1), (2) справедливы при $V \ll c_a$.

Амплитуда изменения относительной плотности среды в области звуковой волны

$$S = \frac{\Delta\rho}{\rho_0}, \quad \text{где } \Delta\rho \text{ – амплитуда колебаний плотности, } \rho_0 \text{ – плотность}$$

невозмущённой среды, называют амплитудой звуковой волны. Эта величина определяет амплитуды изменения:

— показателя преломления
—

$$\frac{\Delta n}{n_0} = C_0 S, \quad (3)$$

— акустического давления
—

$$\Delta p = p_0 \gamma S, \quad (4)$$

— колебательной скорости элементарного объема
—

$$V = c_a S, \quad (5)$$

— смещения элементарного объема

$$A = \frac{\Lambda_a}{2\pi} S, \quad (6)$$

где C_0 – материальная константа, γ – коэффициент сжимаемости, n_0 – коэффициент преломления невозмущенной среды.

При наличии акустической волны зависимость показателя преломления от координат и времени имеет вид:

$$n(x,t) = n_0 + \Delta n \sin(\Omega_a t - K_a x),$$

где $\Delta n \ll n_0$.

Используя известное выражение $\gamma = c_a^2 \frac{\rho_0}{P_0}$ [19], можно установить связь между амплитудами колебательной скорости и акустического давления:

$$\Delta p = c_a \rho_0 V. \quad (7)$$

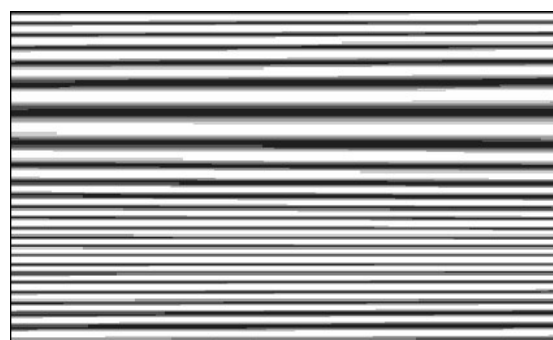
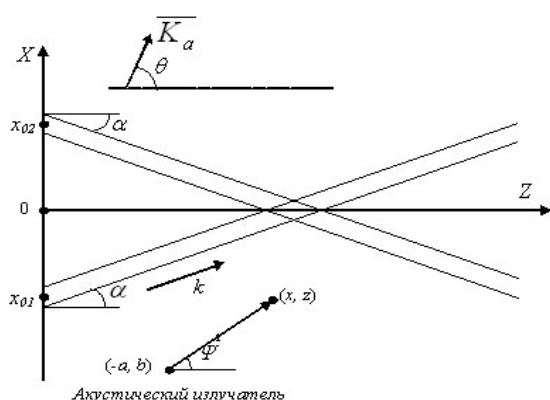
Изменение показателя преломления среды связано с изменением амплитуды акустического давления с следующим образом:

$$\Delta p = \frac{P_0}{C_0 n_0} \Delta n, \quad (8)$$

Например, для воды: $C_0 = 0,24$, $\gamma = 2,2 \cdot 10^4$, $c_a = 1485$ м/с, $n_0 = 1,33$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ИЗМЕРЕННОМУ ЗНАЧЕНИЮ ДЕВИАЦИИ ЧАСТОТЫ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Рассеянное на частице лазерное излучение описывается соотношениями, приведенными в [20] и будет зависеть не только от параметров колебаний частицы, но и от параметров колебаний интерференционной картины (рис.1б), причем в отличие от монохроматического спектра колебаний частицы, спектр колебаний полос содержит гармоники более высокого порядка.



ИСКАЖЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ОБЪЕМЕ

а б
Рисунок 1 – Интерференция лазерных пучков в акустическом поле

Можно показать, что учет нелинейных членов фазового набегла лазерных пучков в среде с акустическим полем позволяет найти коэффициент частотной модуляции m_2 рассеянного излучения на второй гармонике акустического поля

$$m_2 = \frac{K_0 C_a}{2\Delta\omega C_0} \frac{\Delta n^2}{n_0^2}, \quad (9)$$

где

$$K_0 = 2k_0 n_0 \sin \frac{\alpha}{2},$$

$\Delta\omega$ - постоянный сдвиг частот между зондирующими пучками.

Коэффициент частотной модуляции m_2 может быть непосредственно измерен и в то же время выражается через локальные параметры неоднородной среды, в данном случае через амплитуду изменения показателя преломления. Используя (3-5) и (9), выразим m_2 через амплитуду колебательной скорости частицы в области интерференции и параметры зондирующего излучения

$$m_2 = \frac{k_0 n_0 C_0 \sin \frac{\alpha}{2}}{\Delta\omega C_a} U_x^2. \quad (10)$$

При измеренном значении m_2 амплитуда x -составляющей колебательной скорости частицы может быть найдена как

$$U_x = \sqrt{m_2 \frac{C_a}{C_0} \frac{\Delta\omega}{k_0 n_0 \sin \frac{\alpha}{2}}} = \sqrt{\frac{C_a}{C_0} \frac{\lambda_0 \Delta\nu_2}{\sin \frac{\alpha}{2}}}, \quad (11)$$

где λ_0 – длина волны оптического излучения в невозмущенной среде (в отсутствие акустического поля), $\Delta\nu_2$ – измеренная девиация частоты на второй гармонике. Акустическое давление может быть выражено через амплитуду колебательной скорости из (7)

$$\Delta p = c_a \rho_0 \sqrt{\frac{C_a}{C_0} \frac{\lambda_0 \Delta\nu_2}{\sin \frac{\alpha}{2}}}. \quad (12)$$

Из (12) следует, что локальное акустическое давление однозначно может быть определено через невозмущающее измерение значения девиации частоты рассеянного излучения на второй гармонике акустического поля, константы среды и параметры зондирующего лазерного излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована возможность установления однозначной связи между значением локального акустического давления в жидкости и параметрами лазерного излучения, рассеянного на микрочастицах, находящихся в данной области. Показано, что учет нелинейных членов фазового набегает позволяет однозначно выразить локальное избыточное давление в области интерференции двух пересекающихся лазерных пучков через параметры среды и параметры рассеянного излучения, что свидетельствует о принципиальной возможности создания лазерного эталона акустического давления в жидкости.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-00948а).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

A – амплитуда колебаний частицы,

V – амплитуда колебательной скорости,

Ω_a – акустическая частота,

$K_a = \frac{2\pi}{\Lambda_a}$ – модуль волнового вектора,

$\Lambda_a = \frac{c_a}{\Omega_a}$ – длина акустической волны,

c_a – скорость звука в жидкости,

$S = \frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ – амплитуда изменения относительной плотности среды в области звуковой волны,

$\Delta\rho$ – амплитуда колебаний плотности,

ρ_0 – плотность невозмущённой среды,

n – показатель преломления,

n_0 – показатель преломления невозмущенной среды,

C_0 – материальная константа,

γ – коэффициент сжимаемости

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. - М.: Наука, 1982. - 304 с.
2. Karasik A.Ya., Rinkevichius B.S, Zubov.V.A. Laser Interferometry Principles / Ed. by B.S.Rinkevichius., Moscow and Boca Raton: Mir Publishers and CRC Press, 1995. 448 p.
3. Дубнищев Ю.Н. Лазерные доплеровские измерительные технологии. Новосибирск: НГТУ, 2002. 414с.
4. Albrecht H.-E., Borys M., Damashke N., Tropea C. Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques. Berlin: Springer, 2003. 738 p.
5. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С., Фомин Н.А. Новые методы лазерной анемометрии в исследованиях сложных газодинамических течений. // ИФЖ. 2003.т.76, №6, С. 3-12.
6. Ринкевичюс Б.С., Сильвестров С.В., Трохан А.М. О применении ЛДА для измерения колебательной скорости гидроакустического поля. // Проблемы метрологического обеспечения гидроакустических измерений. М.: Изд-во НПО ВНИИФТРИ, 1992. С.41-49.
7. Hann D.B., Jack S.H., Greated C.A., Rinkevichius B.S., Grechikhin V.A., Tolkachev A.V., Stepanov A.V. Laser Doppler Measurements in Complex Sound Fields. // Laser Anemometry: Advances and Appl., Proc. 7th Int. Conf., Univ. of Karlsruhe, 1997, Sept.8-11, pp.102-114.
8. Jack S.H., Hann D.B., Greated C.A. The Influence of the Acousto-optic effect on Laser Doppler Anemometry signals. // Review of Scientific Instruments. 1998. V.69. №12. P. 4074-4081.
9. Hann D.B, Greated C.A. The measurement of sound fields using laser Doppler anemometry. // Acta Acustica. 1999. V.85. PP.401-411.
10. Crickmore R.I., Jack S.H., Hann D.B., Greated C.A. Laser Doppler Anemometry and the Acousto-optic effect. // Optics and laser technology. 1999. V.31. pp.85-94.

11. **Гречихин В.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Влияние акустооптического эффекта на погрешность измерений колебательной скорости частиц лазерным доплеровским анемометром. // Автометрия 2000. №5. С. 92-101.
12. **Гречихин В.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Исследование акустооптического эффекта в области интерференции лазерных пучков. // Квантовая электроника 2003. №8. 742-746.
13. **Расковская И.Л.** Распространение лазерного пучка в среде с акустической волной. // Радиотехника и электроника. 2004. №11. С.1382-1389.
14. **Расковская И.Л.** Теоретическое и экспериментальное обоснование лазерных методов диагностики акустического поля в жидкостях и газах. // Автореферат дис. на соискание ученой степени к.ф.м.н. М.: 2005. 23 с.
15. **Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Определение акустического давления в жидкости по параметрам прошедшего лазерного излучения. // Измерительная техника 2006. №6. С.53-55.
16. **Нгуен В.Т., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С.** Применение лазерных интерференционных методов для диагностики акустического поля. // Измерительная техника. 2008. №1. С.55-59.
17. **Гречихин В.А., Расковская И.Л., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В.** Измерение параметров гидроакустического поля лазерным доплеровским анемометром. // «Оптические методы исследования потоков»: труды 6-й Международной НТК. М: Изд-во МЭИ, 2001. С.436-439.
18. **Расковская И.Л.,** Акустооптический эффект и анализ условий его компенсации при определении параметров акустического поля лазерным доплеровским анемометром // «Оптические методы исследования потоков»: труды 6-й Международной НТК, М: Изд-во МЭИ, 2001. С.472-475.
19. **Korpel A.** Acoustooptics. Inc. New York and Basel: Marcel Dekker. 1988.
20. **Расковская И.Л.** Теоретическое и экспериментальное обоснование лазерных методов диагностики акустического поля в жидкостях и газах. // Диссертация на соискание ученой степени к.ф.м.н. М.: 2005. 123 с.

I.L. Raskovskaya

*National Research University (MPEI), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: raskovskail@mail.ru*

ABOUT THE PRINCIPAL OPPORTUNITY OF MEASUREMENT LOCAL ACOUSTIC PRESSURE IN LIQUID USING LDA INTERFERENCE SCHEME

It is shown that in an ultrasonic field in a liquid, by using the interference scheme of a laser Doppler anemometer (LDA), it is possible to indirectly measure the vibrational velocity of a particle and the corresponding local excess pressure based on detection of laser radiation scattered by particles. The scattered radiation is a frequency-modulated signal, the informative parameter of which is the frequency deviation at the second harmonic of the acoustic field

ULTRASOUND IN LIQUID, LASER DOPPLER ANEMOMETRY, LASER BEAM INTERFERENCE, LOCAL ACOUSTIC PRESSURE