

УДК 535.015 + 57.087.1 + 004.418

© Д. А. Кравчук, 2019

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ОТ ИСТОЧНИКОВ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ ПРИ ОПТОАКУСТИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ В ЖИДКОСТИ

В работе проведено моделирование формирования акустического сигнала при оптоакустическом эффекте источниками в тонком слое жидкости и источником в виде жидкого цилиндра с диаметром, равным диаметру лазерного луча. Установлено, что при генерации акустического сигнала в результате воздействия лазерного луча на тонкий слой жидкости форма и длительность акустического импульса имеют форму и длительность лазерного импульса. При формировании акустического импульса от цилиндра в слое жидкости образуется биполярный сигнал с фронтом нарастания, равным длительности лазерного воздействия, и зоной релаксации, при этом длительность акустического импульса увеличивается.

Кл. сл.: оптоакустический эффект, акустический сигнал, лазер, поглощение, микрочастицы

ВВЕДЕНИЕ

Оптоакустический эффект заключается в образовании акустических волн в жидком образце при его облучении световым пучком различной интенсивности, это явление используется в жидкостной спектроскопии [1, 2].

Механизмы генерации лазерного звука различны, и их относительные вклады сильно зависят от плотности выделяемой энергии. При небольшой энергии линейный термооптический эффект доминирует в процессе генерации звука. Этот эффект основан на тепловом расширении той части среды, где свет был поглощен. Величина акустического отклика, пропорциональна оптическому поглощению жидкости. Это соотношение лежит в основе низкоэнергетической оптоакустической спектроскопии однородных жидкостей [3].

Наличие в жидком слое микрочастиц существенно изменяет характер генерации звука из-за "отложенного" выделения тепла из частиц в жидкость. Эффективность процесса возрастает, если подводимая энергия превышает порог испарения жидкости, окружающей поглощающие частицы. В результате испарения жидкости появляются пузырьки, а их расширение приводит к эффективной генерации звука. При больших запасах энергии поглощающие свет частицы в жидкости играют роль ядер оптического пробоя жидкости. Дальнейшее увеличение интенсивности света, получаемого, например, фокусировкой лазерного луча, приводит к образованию лазерной искры, развивающейся в фокальной области [4].

Эффект возмущающего вклада микрочастиц наблюдался в ряде экспериментальных исследований в оптоакустической спектроскопии, причем наборы статистических свойств оптоакустического сигнала представляют особый интерес [5]. В то же время оптоакустическое преобразование может быть эффективным инструментом для анализа микрочастиц. Оптоакустический вклад отдельных частиц, погруженных в непоглощающую жидкость, был исследован теоретически в случае импульсного лазерного возбуждения [6].

Авторы работы [7] рассматривали возможность обнаружения микрочастиц с помощью механизма лазерного пробоя в процессе оптоакустического преобразования. Свойства оптоакустического отклика были применены для обнаружения субмикронных частиц полистирола при сверхнизкой концентрации. Недостаток разработанной методики заключается в том, что требуется очень высокая интенсивность лазерного излучения, и это приводит к очень малому объему детектирования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Преобразование оптического излучения в акустический сигнал в жидкости при поглощении описывается через потенциал скорости ϕ уравнением [8, 9]

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \phi = \frac{\beta}{\rho C_p} H_t, \quad (1)$$

где c — скорость звука, ρ — плотность жидкости, β — коэффициент расширения изобарического объема, C_p — удельная теплоемкость, t — время и H_t — функция нагрева, вносимого оптическим лучом. Воспользуемся функцией Грина [10] для решения волнового уравнения для потенциала скорости в виде

$$\phi(x,t) = -\frac{\beta}{4\pi\rho_f C_p} \int_0^t \int (g(x,t|x',t')H_t(x',t'))dx'dt', \quad (2)$$

где $g(x,t|x',t') = 2\pi c u \left[(t-t') - \frac{(z-z')}{c} \right]$ — функция Грина для бесконечной среды ($z > z'$), $u(\xi)$ — функция Хевисайда, что дает акустическое давление как

$$p(r,t) = \frac{\beta c}{2C_p r} \times \int r' \left[H_t \left(r', t - \frac{(r-r')}{c} \right) - H_t \left(r', t - \frac{(r+r')}{c} \right) \right] dr'.$$

Проведем исследование генерации акустического сигнала при оптоакустическом преобразовании для случаев формирования акустического сигнала источниками в тонком слое жидкости и источниками внутри цилиндра, образованного лазерным лучом (диаметр $2a = 3.5$ мм, длительность лазерного импульса 84 нс) в жидкости (рис. 1) [11, 12]. Моделирование проводилось

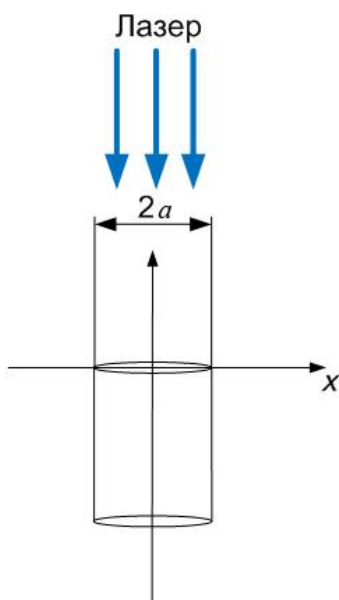


Рис. 1. Геометрия задачи

Физические параметры, используемые в моделировании [13]

Условное обозначение характеристики	Значение
Жидкость	Вода
a , мкм (радиус эритроцита)	2.75
ρ_f , кг/м ³	1000
v_f , м/с	1500
β , К ⁻¹	$1.5 \cdot 10^{-4}$
C_p , Дж/(кг·К)	4183
μ , М ⁻¹	60.58
F , Дж/м ²	1

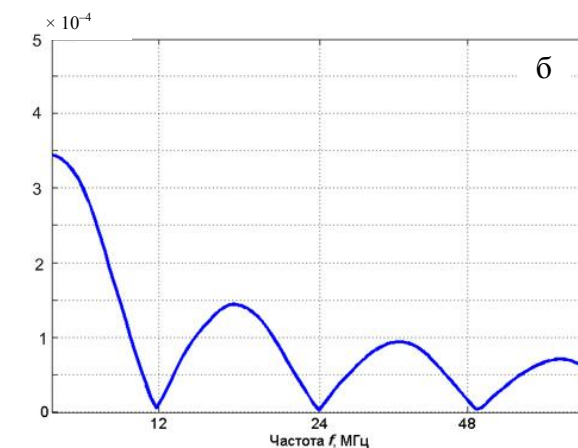
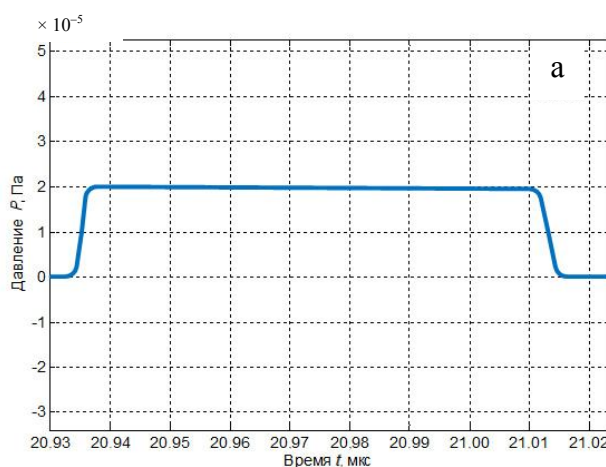


Рис. 2. Акустический сигнал, генерируемый источниками в слое жидкости при оптоакустическом взаимодействии (а) и спектр сигнала (б)

на имеющейся экспериментальной лазерной установке LIMO 100-532/1064-U с целью дальнейшей проверки полученных результатов [14, 15].

Профиль акустической волны, генерируемой длинным световым импульсом, находится путем

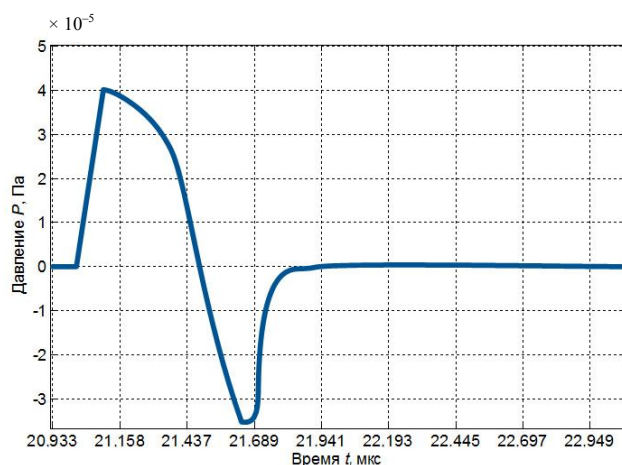


Рис. 3. Акустический сигнал, генерируемый жидким цилиндром

свертки нормированной функции интенсивности света с функциями длинных импульсных откликов (с учетом плотности энергии в световом пучке).

Физические величины для моделирования приведены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 представлен акустический сигнал, полученный в результате воздействия лазерным импульсом на жидкость и сформированный источниками в тонком слое жидкости ($\tau_n \approx 84$ нс).

Смоделируем акустический сигнал, формируемый цилиндрическим источником диаметром 3.5 мм в водном растворе.

На рис. 3 приведен результат моделирования акустического сигнала при оптоакустическом взаимодействии, сформированный источниками, расположенными в цилиндре диаметром 3.5 мм ($\tau_n \approx 550$ нс). Расчеты проводились в среде Matlab R2017.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитаны формы акустических сигналов, формируемых от лазерных импульсов в воде для слоя жидкости и жидкостного цилиндра. Из рис. 2 и 3 видно, что при генерации акустического сигнала в результате воздействия лазерного луча на тонкий слой жидкости форма и длительность импульса соответствуют параметрам лазерного импульса. При формировании акустического импульса от цилиндра в слое жидкости образуется биполярный

сигнал с временем нарастания, равным длительности лазерного воздействия и зоной релаксации. При этом общая длительность сигнала составляла 550 нс. Проведенные расчеты позволяют приблизиться к более сложному процессу моделирования формирования акустического сигнала в жидкости при оптоакустическом эффекте, когда в жидком цилиндрическом источнике могут присутствовать источники микронного размера, что позволит оценить изменение сигнала в зависимости от количества и размеров этих источников [16]. Полученные результаты являются дополнением исследований, проводимых при моделировании оптоакустического сигнала для обнаружения внутриэритроцитарных инфекций в крови и установления уровня кислородонасыщения, для проточной цитометрии [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Patel C.K.N., Tam A.C. Pulsed optoacoustic spectroscopy of condensed matter // *Rev. Mod. Phys. APS*. 1981. Vol. 53, no. 3. P. 517–550. DOI: 10.1103/RevModPhys.53.517
2. Ke H., Liu C., Wang L.V., Erpelding T.N., Jankovic L. Performance characterization of an integrated ultrasound, photoacoustic, and thermoacoustic imaging system // *J. Biomed. Opt.* 2012. Vol. 17, no. 5. 056010. DOI: 10.1117/1.JBO.17.6.061208
3. Гусев В.Э., Карабутов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
4. Barnes P.A., Rieckhoff K.E. Laser induced underwater sparks // *Appl. Phys. Lett.* 1968. Vol. 13, is. 8. P. 282–284. DOI: 10.1063/1.1652611
5. Roveri O.A., Bilmes G.M., Heihoff K., Braslavsky S.E. Laser-induced optoacoustic spectroscopy (LIOAS) of proteins: Spectrum of bovine serum albumin in the 532–670 nm region // *Appl. Spectrosc.* 1990. Vol. 44, no. 10. P. 1706–1710.
6. Diebold G.J., Westervel P.J. The photoacoustic effect generated by a spherical droplet in a fluid // *J. Acoust. Soc. Am.* 1988. Vol. 84, is. 6. P. 2245–2251. DOI: 10.1121/1.397017
7. Schmidt-Kloiber H., Paltauf G., Reichel E. Investigation of the probabilistic behavior of laser-induced breakdown in pure water and in aqueous solutions of different concentrations // *J. Appl. Phys.* 1989. Vol. 66, is. 9. P. 4149–4153. DOI: 10.1063/1.343999
8. Morse P.M., Ingard K.U. *Theoretical Acoustics*. N.Y.: McGraw-Hill, 1968. 927 p.
9. Westervel P.J., Larson R.S. Laser-excited broadside array // *J. Acoust. Soc. Am. ASA*. 1973. Vol. 54, no. 1. P. 121–122.
10. Morse P.M., Feshbach H. Methods of theoretical physics // *Am. J. Phys.* 1954. Vol. 22, no. 6. P. 410–413. DOI: 10.1119/1.1933765

11. *Starchenko I.B., Kravchuk D.A., Kirichenko I.A.* An optoacoustic laser cytometer prototype // *Biomedical Engineering*. 2018. Vol. 51, no. 5. P. 308–312. DOI: 10.1007/s10527-018-9737-8
12. *Кравчук Д.А., Старченко И.Б.* Теоретическая модель для диагностики эффекта кислородонасыщения эритроцитов с помощью оптоакустических сигналов // *Прикладная физика*. 2018. № 4. С. 89–94.
13. *Shung K.K., Thieme G.A.* Ultrasonic scattering in biological tissues. CRC press, 1992. 512 p.
14. *Старченко И.Б., Малюков С.П., Орда-Жигулина Д.В., Саенко А.В.* Измерительный комплекс для лазерной диагностики биообъектов с использованием наночастиц на базе LIMO 100 // *Прикаспийский журнал управление и высокие технологии*. 2013. Т. 2, № 2. С. 166–173.
15. *Kravchuk D.A.* Experimental studies on the excitation and registration of an optoacoustic signal in a liquid // *Proceedings of a meeting held 18-20 April 2019, Tomsk, Russia*. 2019 International Siberian conference on control and communications (SIBCON 2019). Institute of electrical and electronics engineers Inc., 2019. P. 115–117.
16. *Кравчук Д.А.* Моделирование акустических сигналов при оптоакустическом преобразовании для осесимметричных несферических форм эритроцитов // *Научное приборостроение*. 2019. Т. 29, № 2. С. 83–89. URL: <http://iairas.ru/mag/2019/abst2.php#abst11>
17. *Старченко И.Б., Кравчук Д.А., Кириченко И.А.* Прототип оптоакустического лазерного цитометра // *Медицинская техника*. 2017. № 5. С. 4–7.

Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, г. Таганрог

Контакты: *Кравчук Денис Александрович*, kravchukda@sfedu.ru, denik545@ya.ru

Материал поступил в редакцию 10.10.2019

SIMULATION OF AN ACOUSTIC SIGNAL FROM SOURCES OF VARIOUS SHAPES WITH AN OPTOACOUSTIC EFFECT IN A LIQUID

D. A. Kravchuk

Southern Federal University, Institute of Nanotechnologies, Electronics and Equipment Engineering, Taganrog, Russia

In this work we simulated the formation of an acoustic signal with an optoacoustic effect by sources in a thin layer of liquid and a source in the form of a liquid cylinder with a diameter equal to the diameter of the laser beam. It is established that when an acoustic signal is generated as a result of the effect of a laser beam on a liquid thin layer, the shape and duration of the acoustic pulse have the shape and duration of the laser pulse. When an acoustic pulse is generated from the cylinder, a bipolar signal is formed in the liquid layer with a rising edge equal to the duration of the laser exposure and a relaxation zone, while the duration of the acoustic pulse increases.

The performed calculations allow us to approach a more complex process of modeling the formation of an acoustic signal in a liquid with an optoacoustic effect, when micron-sized sources can be present in a liquid cylindrical source, this will let to estimate the signal change depending on the number and size of these sources. The obtained results are in addition to the studies conducted for modeling the optoacoustic signal for detecting intra-erythrocyte infections in the blood and establishing the level of oxygen saturation and for flow cytometry.

Keywords: optoacoustic effect, acoustic signal, laser, absorption, microparticles

REFERENCES

1. Patel C.K.N., Tam A.C. Pulsed optoacoustic spectroscopy of condensed matter. *Rev. Mod. Phys. APS*, 1981. vol. 53, no. 3, pp. 517–550. DOI: 10.1103/RevModPhys.53.517
2. Ke H., Liu C., Wang L.V., Erpelding T.N., Jankovic L. Performance characterization of an integrated ultrasound, photoacoustic, and thermoacoustic imaging system. *J. Biomed. Opt.*, 2012, vol. 17, no. 5, 056010. DOI: 10.1117/1.JBO.17.6.061208
3. Gusev V.E., Karabutov A.A. *Lazernaya optoakustika* [Laser optoacoustics]. Moscow: Nauka, 1991. 304 p. (In Russ.).
4. Barnes P.A., Rieckhoff K.E. Laser induced underwater sparks. *Appl. Phys. Lett.*, 1968, vol. 13, is. 8, pp. 282–284. DOI: 10.1063/1.1652611
5. Roveri O.A., Bilmes G.M., Heihoff K., Braslavsky S.E.

- Laser-induced optoacoustic spectroscopy (LIOAS) of proteins: Spectrum of bovine serum albumin in the 532–670 nm region. *Appl. Spectrosc.*, 1990, vol. 44, no. 10, pp. 1706–1710.
6. Diebold G.J., Westervelt P.J. The photoacoustic effect generated by a spherical droplet in a fluid. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1988, vol. 84, is. 6, pp. 2245–2251. DOI: 10.1121/1.397017
 7. Schmidt-Kloiber H., Paltauf G., Reichel E. Investigation of the probabilistic behavior of laser-induced breakdown in pure water and in aqueous solutions of different concentrations. *J. Appl. Phys.*, 1989, vol. 66, is. 9, pp. 4149–4153. DOI: 10.1063/1.343999
 8. Morse P.M., Ingard K.U. *Theoretical Acoustics*. N.Y.: McGraw-Hill, 1968. 927 p.
 9. Westervelt P.J., Larson R.S. Laser-excited broadside array. *J. Acoust. Soc. Am. ASA.*, 1973, vol. 54, no. 1, pp. 121–122.
 10. Morse P.M., Feshbach H. Methods of theoretical physics. *Am. J. Phys.*, 1954, vol. 22, no. 6, pp. 410–413. DOI: 10.1119/1.1933765
 11. Starchenko I.B., Kravchuk D.A., Kirichenko I.A. An optoacoustic laser cytometer prototype. *Biomedical Engineering*, 2018, vol. 51, no. 5, pp. 308–312. DOI: 10.1007/s10527-018-9737-8
 12. Kravchuk D.A., Starchenko I.B. [Theoretical model for diagnostics of the oxygen saturation of erythrocytes with the use of optoacoustic signals]. *Prikladnaya fizika* [Applied physics], 2018, no. 4, pp. 89–94. (In Russ.).
 13. Shung K.K., Thieme G.A. *Ultrasonic scattering in biological tissues*. CRC press, 1992. 512 p.
 14. Starchenko I.B., Malyukov S.P., Orda-Zhigulina D.V., Saenko A.V. [Measuring system for the laser diagnostics of biological objects using nanoparticles based on LIMO complex]. *Prikaspijskij zhurnal upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian journal: Management and high technologies], 2013, vol. 2, no. 2, pp. 166–173. (In Russ.).
 15. Kravchuk D.A. Experimental studies on the excitation and registration of an optoacoustic signal in a liquid. *Proceedings of a meeting held 18-20 April 2019, Tomsk, Russia. 2019 International Siberian conference on control and communications (SIBCON 2019)*. Institute of electrical and electronics engineers Inc., 2019, pp. 115–117.
 16. Kravchuk D.A. [Modeling of acoustic signals during optoacoustic conversion for axisymmetric non-spherical forms of erythrocytes]. *Nauchnoe priborostroenie* [Scientific instrumentation], 2019, vol. 29, no. 2, pp. 83–89. (In Russ.). DOI: 10.18358/np-29-2-i8389
 17. Starchenko I.B., Kravchuk D.A., Kirichenko I.A. [Optoacoustic laser cytometer prototype]. *Medicinskaya tekhnika* [Medical equipment], 2017, no. 5, pp. 4–7. (In Russ.).

Contacts: *Kravchuk Denis Aleksandrovich*,
kravchukda@sfnu.ru, denik545@ya.ru

Article received by the editorial office on 10.10.2019