

Аналитический результат генерации оптоакустических волн для сферических поглотителей в дальнем поле

Д. А. Кравчук

Южный федеральный университет, Таганрог

Аннотация: В работе получены аналитические выражения амплитуды звукового давления для сферических поглотителей в результате воздействия лазерного излучения в жидкость в дальнем поле. Термооптоакустический эффект приводит к возбуждению акустических волн при поглощении переменного светового потока. Показано, что наблюдаемые в жидких средах оптоакустические эффекты выходят за рамки основополагающих разработанных моделей для идеальных сред и требуют более подробного рассмотрения и уточнения.

Ключевые слова: оптоакустика, оптоакустические волны, биожидкость, сферические источники, поглощение, ближнее поле, дальнее поле.

Постановка задачи

В настоящее время быстро развиваются методы оптоакустической диагностики. В связи с этим возникает необходимость в изучении свойств импульсного звукового отклика в подвергнутых лазерному облучению реальных жидких средах: суспензиях, биологических пробах. Термооптическое возбуждение звука широко применяется в задачах диагностики жидкостей.

Для сферического гауссовского источника начальный рост давления $P_0(r)$ определяется выражением [1-3, 7, 8]

$$P_0(r) = \frac{\beta V^2 E_a}{c_p (2\pi)^{3/2} R_\sigma^3} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{R_\sigma}\right)^2\right\}. \quad (1)$$

где E_a общая поглощенная энергия. В дальнем поле ($r \gg R_\sigma$), акустический переходный $P_s(r, t)$ генерируемый мгновенным нагревом этого пространственного распределения поглощения, определяется формулой (3) с $\tau_l = 0$. Гауссова функция нагрева $T(t)$ описывается

$$T(t) = (\sqrt{2\pi}\tau_l)^{-1} \exp\left\{-\frac{1}{2}(t/\tau_l)^2\right\}; \quad (2)$$

$$P_{\max(r)} = \frac{\beta E_a}{2\sqrt{e}(2\pi)^{3/2} c_p \tau_e^2 r}; \tau = \frac{r}{V};$$

$$\tau_e = \sqrt{\tau_\alpha^2 + \tau_l^2}; \tau_\alpha = \frac{R_\sigma}{V}$$

Для $r \gg R_s$ пренебречь вкладом в сигнал РА, исходящий из объема источника вне сферы с радиусом r , и свертку $P_d(r, t)$ с $T(t)$

$$P(r, t) = -P_{\max}(r) \sqrt{e} \frac{t - \tau}{\tau_e} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{t - \tau}{\tau_e}\right)^2\right\} \quad (3)$$

$$P_{\max(r)} = \frac{\beta E_a}{2\sqrt{e}(2\pi)^{3/2} c_p \tau_e^2 r}; \tau = \frac{r}{V};$$

$$\tau_e = \sqrt{\tau_\alpha^2 + \tau_l^2}; \tau_\alpha = \frac{R_\sigma}{V}$$

Это выражение является приближением дальнего поля.

Чтобы получить корректное выражение, включающее ближнее поле, необходимо добавить второй член, как указано в уравнении (16), то есть такое же выражение, вычисленное в отрицательное время, должно быть добавлено.

$$\begin{aligned} P_{\delta t}(r, t) &= \\ &= \int_0^\infty -\nabla P_0(r') \left[\left\{ U\{r' - vt - r\} + \left(\frac{r - vt}{2r}\right) * U\{r - |r' - vt|\} U\{r' + vt - r\} \right\} \right] U(t) dr' = \\ &= \left[\left(\frac{r - vt}{2r}\right) P_0(|r - vt|) + \left(\frac{r + vt}{2r}\right) P_0(r + vt) \right] U(t) \end{aligned}$$

Максимумы ОАС находятся при $t = r/v \pm \tau_e$, а интервал пикового пика τ_{pp} может быть выражен как

$$\tau_{pp} = 2\tau_e \sqrt{T_{fl}^2 + \left(\frac{D_{fl}}{V}\right)^2}, \quad (30)$$

где T_{fl} - интервал между точками изгиба временного профиля функции нагрева, а D_{fl} - расстояние между точками изгиба пространственного распределения тепла.

Для продольных акустических волн в водных средах основными источниками ослабления сигнала являются термоупругие или теплопроводные потери, релаксационное поглощение или вязкие потери [7, 8]. Оба механизма акустического ослабления пропорциональны квадрату частоты. В материалах с большими молекулярными цепочками затухание, обусловленное поглощением гистерезиса или потерями в изменении состояния, пропорционально частоте. Амплитудный спектр теоретического ОА-импульса при наличии звукопоглощения (пропорциональный f^2) определяется формулой [7-11]

$$|P_A(r, f)| = \frac{BE_\alpha}{2c_p r} \exp\left\{-2(\pi\tau_e)^2 + \gamma r\right\} f^2 \quad (4)$$

Коэффициент поглощения звука в зависимости от частоты для амплитуды давления пропорционален квадратичной частоте и равен [7-8] $\alpha = \gamma f^2$, где $\gamma = 25 \cdot 10^{-15} \text{ с}^2 / \text{м}$ и f - частота акустической волны. преобразование Фурье оптоакустического импульса, дает амплитудный спектр импульса, который следует умножить на частотно-зависимое поглощение звука и затем преобразовать обратно во временную область, чтобы найти изменение ОА импульса во временной области за счет поглощения.

После обратного преобразования Фурье $P_A(r, f)$, зависящий от времени ослабленный ОА-импульс $P_A(r, t)$, снова описывается уравнением (3), за исключением того, что эффективную постоянную времени τ_e следует заменить на зависящую от расстояния эффективную временную константу $\tau_e(r)$, определяемую формулой

$$\tau_e(r) = \sqrt{\tau_l^2 + \tau_a^2 + \frac{\gamma r}{2\pi^2}} \quad (5)$$

Где τ_a и τ_l определены по-прежнему, а γ - коэффициент ослабления спектральной амплитуды.

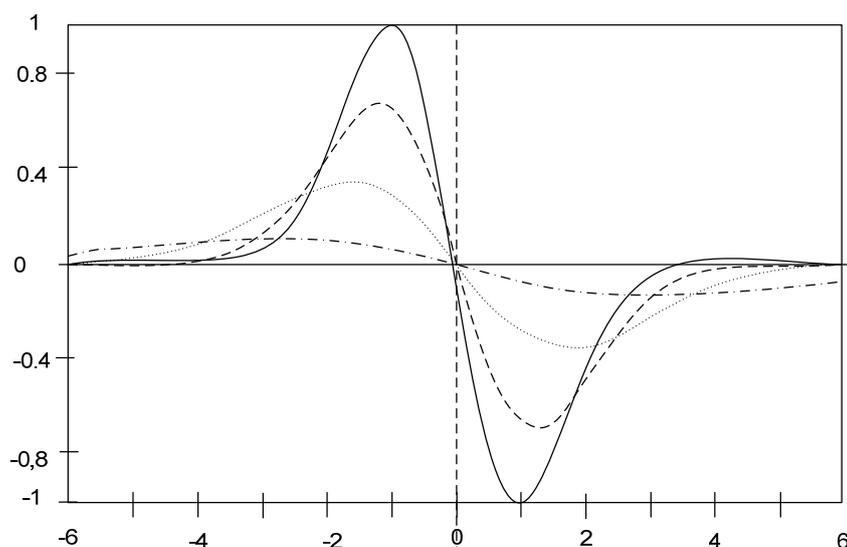


Рис.8 Влияние поглощения звука в воде на теоретический сигнал ПА, генерируемый сферическим распределением нормальных источников. Кривые соответствуют разным расстояниям распространения. Сигналы нормированы по отношению к сигналу в точке наблюдения для без поглощения. (сплошная при $r=0$ см, пунктирная $r=1$ см, точечная $r=5$ см, пунктир с точкой $r=12$ см)

Выводы

На рис.8 временные профили сферического ОА-импульса показаны для некоторых расстояний распространения r относительно соответствующих сигналов при отсутствии поглощения звука. Радиус источника R_s составляет 6 мкм, имитируя группу из нескольких красных кровяных клеток, как наименьший возможный объем источника, а длительность лазерного импульса $2\tau_l$ составляет 84 нс и периодом следования 10 кГц [4-6]. Длительность импульса выбрана в соответствии с техническими характеристиками лазерного комплекса ЛМО 100-532/1064-4 на основе Nd:YAG лазера с фиксированной длиной волны 1064 нм. Для больших радиусов ОА источника или более длительных длительностей лазерных



импульсов искажение ОА импульса менее заметно из-за более низкой средней частоты ОАС.

Литература

1. Кравчук Д.А. Экспериментальные исследования и моделирование процесса генерации оптоакустических волн // Инженерный вестник Дона, 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4234.
2. Кравчук Д.А., Д.В. Орда-Жигулина, Г.Ю. Слива Экспериментальные исследования оптоакустического эффекта в движущейся жидкости. Известия ЮФУ. Технические науки №4 (189), 2017. С. 246-254
3. Кравчук Д.А. Теоретические исследования генерации оптоакустических волн в жидкости цилиндрическими поглотителями // Инженерный вестник Дона, 2017, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4350.
4. Д.А. Кравчук, И.Б. Старченко, И.А. Кириченко Прототип оптоакустического лазерного цитомера // Медицинская техника №5 (305), 2017. с 4-7.
5. Кравчук Д.А. Моделирование системы регистрации акустического сигнала в результате возбуждения оптико-акустического эффекта в жидкости. //Успехи современной науки. 2016. Т. 4. № 11. С. 121-123.
6. Кравчук Д.А. Система регистрации оптоакустического эффекта в жидкости. Результаты эксперимента. //Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 5. № 12. С. 131-133.
7. Н. М. Lai and K. Young, "Theory of the pulsed optoacoustic technique," J. Acoust. Soc. Am. 72, pp.2000–2007 .1982.
8. Beard P. Biomedical photoacoustic imaging // Interface Focus 1. – 2011. – pp. 602–631.

9. Кравчук Д.А., Кириченко И.А., Орда-Жигулина Д.В. Обзор методов использования наноразмерных объектов в биомедицинских исследованиях Научные труды SWorld. 2015. Т. 5. № 4 (41). С. 24-27.

10. Kravchuk D.A., Vtorushin A.S., Myakinin V.A. Tendencies of development of optoacoustic methods and devices in biomedicine // SWorldJournal. 2016. V. 10. № j116 (10). pp. 42-45.

11. Кравчук Д.А. Система регистрации акустического сигнала в результате возбуждения оптико-акустического эффекта в жидкости// В сборнике: Проблемы автоматизации. Региональное управление. Связь и автоматика (Паруса - 2016). Сборник трудов V Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. 2016. С. 116-119.

References

1. Kravchuk D.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4234.

2. Kravchuk D.A., D.V. Orda-Zhigulina, G.Ju. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki №4 (189), 2017. pp. 246-254

3. Kravchuk D.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4350.

4. D.A. Kravchuk, I.B. Starchenko, I.A. Kirichenko Medicinskaja tehnika №5 (305), 2017. pp.4-7

5. Kravchuk D.A. Uspehi sovremennoj nauki. 2016. V. 4. №11. pp. 121-123.

6. Kravchuk D.A. Uspehi sovremennoj nauki i obrazovanija. 2016. V. 5. № 12. pp. 131-133.

7. H. M. Lai and K. Young, "Theory of the pulsed optoacoustic technique," J. Acoust. Soc. Am. 72, pp.2000–2007. 1982.



8. Beard P. Biomedical photoacoustic imaging. Interface Focus 1. 2011. pp. 602–631.

9. Kravchuk D.A., Kirichenko I.A., Orda-Zhigulina D.V. Nauchnye trudy SWorld. 2015. V. 5. № 4 (41). pp. 24-27.

10. Kravchuk D.A., Vtorushin A.S., Myakinin V.A. SWorldJournal. 2016. V. 10. № j116 (10). pp. 42-45.

11. Kravchuk D.A. V sbornike: Problemy avtomatizacii. Regional'noe upravlenie. Svjaz' i avtomatika (Parusa - 2016). Sbornik trudov V Vserossijskoj nauchnoj konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov. 2016. pp. 116-119.