

Статистическая модель оптоакустического преобразования в движущейся жидкой среде в присутствии наночастиц для системы неинвазивного анализа крови

Д.В. Орда-Жигулина¹, М.В. Орда-Жигулина¹, И.Б. Старченко²

¹Южный научный центр Российской Академии наук, Ростов-на-Дону
²ООО «Параметрика», Таганрог

Аннотация: В данной статье предлагается статистическая модель оптоакустического преобразования в движущейся жидкой среде в присутствии наночастиц для системы неинвазивного анализа крови, так как для повышения точности измерений следует учитывать вероятностный характер распределения наноразмерных объектов в качестве контрастных агентов в потоке крови в сердечно-сосудистой системе человека уже на этапе обработки первичных данных о параметрах крови пациента. Для определения статистических характеристик составляющей звукового сигнала, сформированного конгломератом наноразмерных объектов, было проведено моделирование по методу Монте-Карло, рассчитаны основные статические характеристики и определена плотность распределения вероятности нормированной амплитуды звукового сигнала для серий численных экспериментов.

Ключевые слова: оптоакустика, оптоакустический эффект, проточная цитометрия, акустический сигнал, углеродные нанотрубки, лазерное возбуждение звука, статистический анализ.

Введение. В настоящее время актуальной задачей является повышение точности измерений в системах неинвазивного анализа крови для оптоакустической (далее – ОА) проточной цитометрии в присутствии наноразмерных объектов [1-3]. При решении такой задачи целесообразно учитывать вероятностный характер распределения наноразмерных объектов в качестве контрастных агентов в потоке крови в сердечно-сосудистой системе человека.

Такой статистический учет позволит улучшить точность измерений уже на этапе обработки первичных данных о параметрах крови пациента. Физические эффекты при ОА преобразовании, акустические аспекты и механизмы взаимодействия лазерного излучения с жидкой средой в присутствии наноразмерных объектов, которые также необходимы для построения статистической модели, были ранее опубликованы в [4-6].

Основная часть. В данной работе рассматриваются статистические характеристики ОА преобразования в суспензиях с наноразмерными объектами под действием лазерного импульса наносекундной длительности. ОА-эффект в неоднородных жидких суспензиях рассматривается в допущении однократного рассеяния света.

Применение метода ОА диагностики в медицине, согласно опубликованным в литературе данным, является перспективным для такой медицинской суспензии, как раствор наночастиц [7-11].

Вероятностный характер распределения частиц при ОА преобразовании был впервые исследован авторами [8]. Количественно рассчитать уровень акустического сигнала при ОА-эффекте в движущейся жидкой среде в результате воздействия импульсного лазерного излучения нанометрового порядка можно описать следующим выражением [9]:

$$P_m \approx (\mu\beta c^2 E) / (\pi\alpha_0^{3/2} c_p r^{1/2}), \quad (1)$$

где μ , β – коэффициенты поглощения лазерного излучения и объемного теплового расширения, соответственно, c – скорость звука, c_p – удельная теплоемкость растворителя, E – величина энергии лазерного излучения, a_0 – диаметр лазерного луча, r – расстояние до точки наблюдения.

Изучение ОА преобразования в неоднородных растворах показали, что уровень генерируемого акустического сигнала неоднороден. В сериях измерений регистрировались акустические сигналы кавитационного характера и высокой мощности, которые были больше сигналов, возникающих в результате термооптического возбуждения. Такие сигналы возникали в результате нагрева неоднородностей, которыми в рассматриваемом случае являются наноразмерные объекты.

Механизм заключается в следующем: жидкая среда является прозрачной для оптического сигнала, а взвешенные наноразмерные объекты

эффективно нагреваются. Когда плотность падающей оптической энергии мала, то акустические волны возникают в результате теплового расширения жидкости, нагреваемой непосредственно оптическим излучением, и, одновременно, в результате получения энергии от взвешенных в растворе наноразмерных объектов [8-10].

Суммарная амплитуда акустического сигнала:

$$P(\varepsilon) = (\varepsilon - \varepsilon_{ih}) / \varepsilon_{ih}.$$

Такой сигнал возникает при ОА преобразовании в движущейся жидкой среде в присутствии наноразмерных объектов и может быть рассчитан как сумма амплитуд всех акустических сигналов, генерируемых каждым наноразмерным объектом в жидкости. Плотность потока энергии излучения описывается следующим выражением [11]:

$$\varepsilon(z, r) = \frac{\varepsilon_m}{1 + (z / a_{\text{продольное}})^2} \exp \left\{ -\frac{(r / a_{\text{поперечное}})^2}{1 + (z / a_{\text{продольное}})^2} \right\}, \quad (2)$$

где ε_m – плотность потока энергии.

После подстановки выражения (2) в (1) было определено среднее количество частиц большее порогового $\langle N_{ih} \rangle$. Также была рассчитана усредненная величина амплитуды $\langle P_N \rangle$. Вычисления проводились для нескольких сессий облучения раствора, который представлял собой однородную движущуюся модельную жидкости с наноразмерными объектами, количество частиц в которой составляло $N \approx 10^6$.

Для определения статистических характеристик составляющей звукового сигнала, сформированного конгломератом наноразмерных объектов, было проведено моделирование по методу Монте-Карло [7]. Результаты расчетов показаны на рис. 1 для различных значений плотности потока энергии излучения лазера.

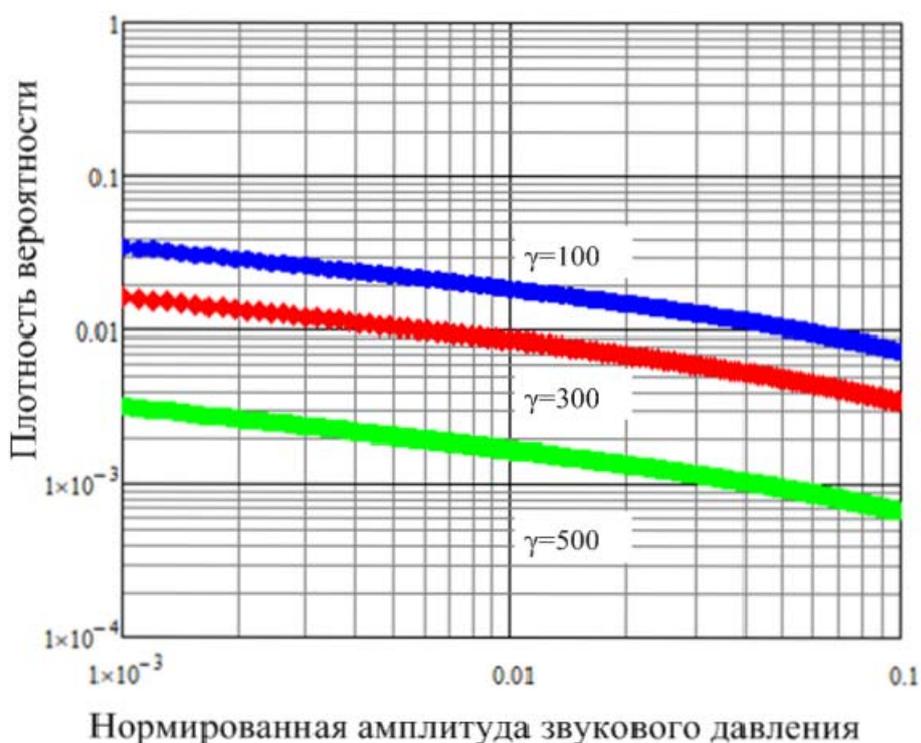


Рис. 1 – Плотность распределения вероятности нормированной амплитуды звукового сигнала для серий численных экспериментов

На рис. 1 синяя кривая соответствует значению энергетического параметра $\gamma = 100$, красная - $\gamma = 300$, зеленая - $\gamma = 500$, где число наночастиц составляет порядка $\sim 10^6$, при $a_{\text{поперечное}} = 1$, $a_{\text{продольное}} = 30$, $L = 6000$, $D = 125$. Нормированная амплитуда сигнала для каждого из N проведенных численных экспериментов рассчитывалась путем суммирования пронормированных амплитуд сигнала для каждого наноразмерного объекта. Определенное количество серий облучения жидкости было теоретически промоделировано для каждой i -той ситуации. Данные расчетов совпали с данными авторов, приведенными в открытых источниках [7]. Для каждого значения γ вычислялась плотность распределения вероятности амплитуды акустического сигнала.

Выводы. Как следует из результатов численного эксперимента, плотность распределения при небольшой величине γ изменяется

незначительно для всего диапазона измерений. Снижение до 0 наблюдается при значениях нормированной амплитуды $P = \gamma - 1$. При увеличении энергетического параметра γ наблюдается существование области, где распределение может быть описано степенным законом.

Литература

1. Наумов В.Ю., Орда-Жигулина Д.В., Сobotницкий И.С. Принципы метрологии информационных измерительных систем для аналитических измерений в медицине. // Инженерный вестник Дона, 2012, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1479

2. Орда-Жигулина Д.В., Старченко И.Б. Теоретическая модель процесса лазерного возбуждения акустических сигналов в жидкой среде с присутствием наноразмерных объектов. // Инженерный вестник Дона, 2012, №4, ч.1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1224

3. Старченко И.Б., Кравчук Д.А., Кириченко И.А. Прототип оптоакустического лазерного цитометра. // Медицинская техника. 2017. №5 (305). С. 4-7.

4. Джуплина Г.Ю., Закарян В.А., Калашников Г.В., Саенко А.В., Старченко И.Б. Экспериментальные исследования оптоакустического эффекта в модельных суспензиях нанотрубок и нановолокон с использованием инфракрасного лазера. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №9 (122). С. 180-186.

5. 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. № 2 (22). С. 166-173.

6. Alekseev Yu.I., Orda-Zhigulina M.V., Shon L.T. Investigation of injection laser optical beam modulation non-linear effects. // Нелинейный мир. 2010. P. 779.

7. С.В. Егерев, О.Б. Овчинников, А.В. Фокин. Оптоакустическое преобразование в суспензиях: конкуренция механизмов и статистические характеристики. // Акустический журнал, №2(51), 2005. С. 204-211.

8. Karabutov, Alexander A., Savateeva Elena V.; Oraevsky Alexander A. Optoacoustic supercontrast for early cancer detection. // SPIE, Volume 4256, 2001. pp. 179-187.

9. S. S. Alimpiev, Ya. O. Simanovskii, S. V. Egerev, A. E. Pashin. Optoacoustic detection of microparticles in liquids at laser fluences below the optical breakdown threshold. // Laser Chemistry, Volume 16, 1994. P. 63-73.

10. Andrew C. Tam. Applications of photoacoustic sensing techniques. // Reviews of Modern Physics, Volume 58, 1986. pp. 381-431.

11. Л.М. Лямшев. Возбуждение звука лазерными импульсами при оптическом пробое микронеоднородной жидкости. // Письма в ЖТФ, №8(26). 2000. С. 56-64.

12. Кравчук Д.А., Старченко И.Б. Модель формирования оптоакустического сигнала от эритроцитов для лазерного цитомера. Лазерная медицина. 2018. Т. 22. № 1. С. 57-60.

References

1. Naumov V.Ju., Orda-Zhigulina D.V., Sobotnickij I.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012. №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1479

2. Orda-Zhigulina D.V., Starchenko I.B. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012. №4, p.1. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1224

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



4. Dzhuplina G.Ju., Zakarjan V.A., Kalashnikov G.V., Saenko A.V., Starchenko I.B. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. . 2011. №9 (122). pp. 180-186.
5. Starchenko I.B., Maljukov S.P., Orda-Zhigulina D.V., Saenko A.V. Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii. 2013. № 2 (22). pp. 166-173.
6. Alekseev Yu.I., Orda-Zhigulina M.V., Shon L.T. Nelinejnyj mir. 2010. p. 779.
7. S.V. Egerev, O.B. Ovchinnikov, A.V. Fokin. Akusticheskij zhurnal, №2 (51), 2005. pp. 204-211.
8. Karabutov, Alexander A., Savateeva Elena V.; Oraevsky Alexander A. SPIE, Volume 4256, 2001. pp. 179-187.
9. S. S. Alimpiev, Ya. O. Simanovskii, S. V. Egerev, A. E. Pashin. Laser Chemistry, Volume 16, 1994. pp 63-73.
10. Andrew C. Tam. Reviews of Modern Physics, Volume 58, 1986. P. 381-431.
11. L.M. Ljamshev. Pis'ma v ZhTF, №8 (26). 2000. pp. 56-64.
12. Kravchuk D.A., Starchenko I.B. Lazernaja medicina. 2018. T. 22. № 1. pp. 57-60.