

method. *Quantum electronics*. 1999. Volume 29, No. 3. p. 215.

3. Botygipa N.N., Bukaty V.I., Khmelevtsov S.S. Generation of the acoustic waves arising in the course of interaction of a laser impulse with water. *Acoustic magazine*. Volume XXII. Release 5. 1976. Pp. 652–657.

4. Sigrist M.W., Kneubühl F.K. Laser generated stress waves in liquids. *Journal Acoust. Soc. Am.* 64. 1978. Pp. 1652–1663.

5. D.L. Balageas, J.C. Krapez, P. Cielo Pulsed photothermal modelling of layered materials. *Journal Appl. Phys.* 59. 1986. Pp. 348–357.

6. C.-L. Hu Spherical model of an acoustical wave generated by rapid laser heating in a liquid. *Journal Acoust. Soc. Am.* 46. 1969. Pp. 728–736.

7. H.M. Lai, K. Young Theory of the pulsed optoacoustic technique. *Journal Acoust. Soc. Am.* 72. 1982. Pp. 2000–2007

8. Kravchuk D.A. The system of registration of optoacoustic effect in liquid. Results of an experiment. *Progress of modern science and education*. 2016. Volume 5. No. 12. Pp. 131–134.

9. Kravchuk D.A. Modeling of system of registration of an acoustic signal as a result of arousing optoacoustic effect in liquid. *Achievements of modern science*. 2016. Volume 4. No. 11. Pp. 121–123.

10. Kravchuk D.A. Pilot studies and modeling of process of generation of optoacoustic waves. Online scientific magazine «Engineering bulletin of Don», No. 2 (2017). [URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4234.]

О методе моделирования оптоакустических сигналов от источников сферической формы на примере эритроцитов

Д.А. Кравчук

доцент кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Южного федерального университета ИНЭП; г. Ростов-на-Дону

e-mail: denik545@ya.ru

Аннотация. Разработана теория возбуждения оптоакустического сигнала на рассеивателях сферической формы, для моделирования агрегированных и не агрегированных эритроцитов. Исследование агрегации эритроцитов необходимо для установления количества агрегатов, т.к. гиперагрегация является патологией.

Ключевые слова: лазер, диагностика, оптоакустические волны, биожидкость, эритроциты, сферические источники.

Введение

Оптоакустическая (ОА) визуализация является активной областью биомедицинских исследований, которая привлекает большое внимание в последние годы. При ОА-визуализации ткани обычно облучаются лазером с коротким импульсом. Ткани поглощают энергию падающего излучения, нагреваются, подвергаются термоупругим расширениям и затем испускают волны давления. По существу, оптические и термоупругие свойства ткани исследуются путем обнаружения волн давления с использованием ультразвуковых технологий после освещения лазерным излучением. Оптоакустический метод никогда не использовался для изучения агрегации эритроцитов в крови человека. Хотя агрегация эри-

троцитов (красных кровяных клеток) в крови человека – это нормальное явление, гиперагрегация является патологическим состоянием. Она связана с широким спектром патологических состояний, таких как острый инфаркт миокарда, церебральная ишемия, диабет и серповидно-клеточная анемия. Это происходит из-за присутствия в крови больших белков плазмы, что при ненормальных уровнях [1] и может приводить к различным сердечно-сосудистым расстройствам.

Агрегация эритроцитов косвенно оценивается для клинических целей через скорость оседания эритроцитов (СОЭ), но этот метод плохо коррелирует с агрегацией эритроцитов [2]. В работе [3] для измерения агрегации эритроцитов использовался метод оптической когерентной томографии в доплеровском спектре. Результаты показали, что дисперсия спектра частот Доплера способна дифференцировать неагрегирующие и агрегирующие эритроциты при гематокритах от 30% до 55%.

Постановка задачи

Цель работы – показать, что ОА-метод может быть реализован на практике для оценки неинвазивного уровня агрегации эритроцитов.

Волновое уравнение для давления, создаваемого при поглощении оптического излучения (теплопроводность остается равной нулю до того, как импульс давления запущен):

$$\nabla^2 p - \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\frac{\beta}{C_p} \frac{\partial H}{\partial t},$$

где β – коэффициент изобарного теплового расширения, C_p – теплоемкость на единицу массы, v_s – скорость звука в освещенной области, H – тепловая энергия, выделяемая оптическим излучением в единицу времени в единичном объеме.

Решение волнового уравнения сводится к решению следующей системы:

$$\nabla^2 p + k^2 p = \begin{cases} \frac{i\omega\mu\beta I_0}{C_p} & \text{Внутри поглотителя} \\ 0 & \text{Снаружи поглотителя} \end{cases},$$

где k – волновое число.

Аналитическое решение этой системы можно получить для различных форм поглотителей (цилиндра, сферы, слоя).

Давление ОА-сигнала для равномерного освещения сферического поглотителя на расстоянии r в окружающей среде можно найти как

$$p_f^{one}(\hat{q}) = \frac{i\omega\mu\beta I_0 v_s \alpha}{C_p (r/a)} \frac{[\sin \hat{q} - \hat{q} \cos \hat{q}] e^{ik_f(r-\alpha)}}{\hat{q} \left[(1-\hat{q}) \left(\frac{\sin \hat{q}}{\hat{q}} \right) - \cos \hat{q} + i \hat{\rho} \hat{v} \sin \hat{q} \right]},$$

где безразмерная частота \hat{q} определяется как $\hat{q} = \omega\alpha/v_s$, α – радиус поглощающей сферы. Аналогично, безразмерные величины $\hat{\rho} = \rho_s/\rho_f$ и $\hat{v} = v_s/v_f$ представляют собой отношения плотности и скорости звука, соответственно.

Давления ОА-сигнала, создаваемое совокупностью поглощающих сфер, можно записать в виде линейной суперпозиции сферических волн, испускаемых отдельными источниками, в виде:

$$p_f^{several}(\hat{q}) = \frac{i\mu\beta I_0 v_s^2 \alpha}{C_p} \times \frac{[\sin \hat{q} - \hat{q} \cos \hat{q}]}{\hat{q}^2 \left[(1-\hat{q}) \left(\frac{\sin \hat{q}}{\hat{q}} \right) - \cos \hat{q} + i \hat{\rho} \hat{v} \sin \hat{q} \right]} \sum_{n=1}^N \frac{e^{ik_f(|r-r_n|-\alpha)}}{|r-r_n|}.$$

Суммарный член учитывает интерференцию волн давления, генерируемых многими источниками, расположенными в пространстве.

Разработана методика агрегации клеток до максимального состояния кластеризации агрегатов (99%) с помощью метода гексагональной упаковки для двумерного моделирования агрегированных и неагрегированных образцов. Эри-

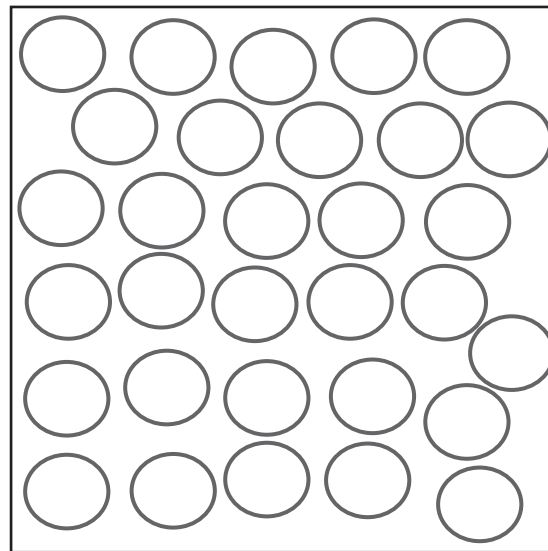


Рис. 1. Случайным образом расположенные эритроциты

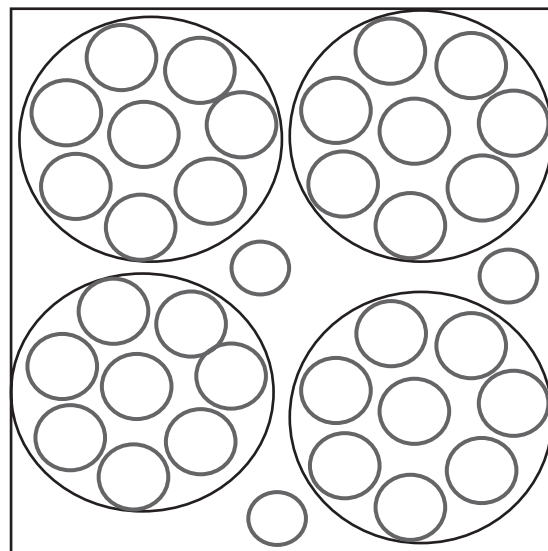


Рис. 2. Случайным образом расположенные кластеры эритроцитов

троциты – наиболее многочисленные клетки крови (до 98%), вклад лейкоцитов и тромбоцитов не учитывался. Следовательно, эритроциты можно считать основными поглотителями оптического излучения [4].

Представленная здесь модель использовалась для изучения варьирования амплитуды ОА-сигнала и спектра мощности в зависимости от уровня агрегации эритроцитов. Результаты моделирования необходимы для продолжения разработок системы проточной цитометрии, которые описаны в [5–7]. В дальнейшем предстоит рассчитать по разработанной модели распределение давления, частотный спектр для проб крови, содержащих неагрегированные эритроциты при различных гематокритах.

Литература

1. H. Baumler, B. Neu, E. Donath, and H. Kiese-wetter, «Basic phenomena of red blood cell rouleaux formation,» *Biorheology* 36, 439–442 (1999).
2. R.B. Ami, G. Barshtein, D. Zeltser, Y. Goldberg, I. Shapira, A. Roth, G. Keren, H. Miller, V. Prochorov, A. Eldor, S. Berliner, and S. Yedgar, «Parameters of red blood cell aggregation as correlates of the inflammatory state,» *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 280(5), H1982–H1988 (2001).
3. X.Xu, L. Yu, and Z. Chen, «Velocity variation assessment of red blood cell aggregation with spectral domain Doppler optical coherence tomography,» *Ann. Biomed. Eng.* 38, 3210–3217 (2010).
4. K.K. Shung, Y.W. Yuan, D.Y. Fei, and J.M. Tarbell, «Effect of flow disturbance on ultrasonic backscatter from blood,» *J. Acoust. Soc. Am.* 75, 1265–1272 (1984).
5. Кравчук Д.А., Орда-Жигулина Д.В., Слива Г.Ю. Экспериментальные исследования оптоакустического эффекта в движущейся жидкости// Известия ЮФУ. Технические науки. 2017, № 4 (189). – С. 246–254.
6. Кравчук Д.А. Экспериментальные исследования и моделирование процесса генерации оптоакустических волн// Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», № 2 (2017). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4234.
7. Теоретические исследования генерации оптоакустических волн в жидкости цилиндрическими поглотителями/ Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», № 2 (2017). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4350> ISSN 2073-8633.

About the Method of Modelling of Optoacoustic Signals from Sources of Spherical Shape on the Example of Erythrocytes

D.A. Kravchuk, associate professor of department of electrohydroacoustic and medical equipment of the Nanotechnologies, electronics and instrument making, Southern Federal University; Rostov-on-Don

e-mail: denik545@ya.ru

Summary. The theory of excitement of an optoacoustic signal on the lenses of spherical shape, for modeling aggregated and not aggregated erythrocytes is developed. The research of aggregation of erythrocytes is necessary for establishment of number of units since hyper aggregation is pathology.

Keywords: laser, diagnostics, optoacoustic waves, bio-liquid, erythrocytes, spherical sources.

References:

1. H. Baumler, B. Neu, E. Donath, H. Kiese-wetter Basic phenomena of red blood cell rouleaux formation. *Biorheology* 36. 1999. Pp. 439–442
2. R.B. Ami, G. Barshtein, D. Zeltser, Y. Goldberg, I. Shapira, A. Roth, G. Keren, H. Miller, V. Prochorov, A. Eldor, S. Berliner, S. Yedgar Parameters of red blood cell aggregation as correlates of the inflammatory state. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 280(5), H1982–H1988 (2001).
3. X. Xu, L. Yu, Z. Chen Velocity variation assessment of red blood cell aggregation with spectral domain Doppler optical coherence tomography. *Ann. Biomed. Eng.* 38, 3210–3217 (2010).
4. K.K. Shung, Y.W. Yuan, D.Y. Fei, and J.M. Tarbell, «Effect of flow disturbance on ultrasonic backscatter from blood,» *J. Acoust. Soc. Am.* 75, 1265–1272 (1984).
5. Kravchuk D.A., Orda-Zhigulina D.V., Sliva G.Yu. Pilot studies of optoacoustic effect in moving liquid. *News of Southern Federal University. Technical science.* 2017. No. 4 (189). Pp. 246–254.
6. Kravchuk D.A. Pilot studies and modeling of process of generation of optoacoustic waves. Online scientific magazine *Engineering bulletin of Don*, No. 2 (2017). [URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4234.]
7. Theoretical researches of generation of optoacoustic waves in liquid cylindrical absorbers. Online scientific magazine «The engineering bulletin of Don», No. 2 (2017). [URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4350> ISSN 2073-8633]