

## ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЙ ПИНЦЕТ ДЛЯ МАНИПУЛИРОВАНИЯ МИКРОЧАСТИЦАМИ

М.Л. Лоскутникова

М.А. Якимова

В.И. Алехнович

vial@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Исследовано воздействие оптико-акустического пинцета на микрочастицу. Проведен анализ влияния параметров лазерного излучения, а именно, радиуса пятна и длительности импульса, на значение усредненной силы воздействия поля фотоакустической волны на частицу. Определены оптимальные параметры воздействия на частицы из полистирола

### Ключевые слова

*Оптико-акустический пинцет, манипулирование микрочастицами, метод конечных разностей*

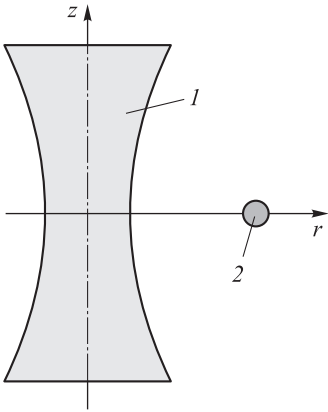
Поступила в редакцию 02.11.2016  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 141901216*

**Введение.** В настоящее время задача манипулирования нано- и микроразмерными частицами является актуальной во многих областях науки и техники [1, 2]. Оптико-акустический пинцет представляет собой перспективный инструмент для решения большого числа задач: с его помощью можно осуществлять пространственное перемещение частиц по заданной траектории, удержание их в определенной области пространства, сортировку как металлических, так и диэлектрических частиц. При этом не происходит поглощения лазерного излучения частицами, что особенно важно при работе с массивными частицами и живыми объектами. Это делает возможным применение оптико-акустических пинцетов в таких областях, как управление потоками лекарственных средств в живых тканях, внутриклеточная хирургия, исследование колоний микроорганизмов, а также при сепарации и структурировании коллоидных частиц [3, 4]. Для корректного выполнения этих задач требуется уделять особое внимание выбору параметров лазерного излучения, вызывающего оптико-акустический эффект. В связи с этим необходимо создание и тщательный анализ математической модели, описывающей указанный процесс.

**Модель задачи и ее основные положения.** Работа оптико-акустического пинцета основана на генерации акустического поля за счет теплового расширения жидкости, вызванного поглощением лазерного излучения, иногда с образованием газового пузырька. Рассмотрим слой жидкости, в котором находится взвешенная частица (рис. 1). Сквозь жидкость распространяется лазерное излучение, которое существенно поглощается жидкостью. Запишем уравнение для описания импульсного излучения, полагая, что пространственное распределение интенсивности в среде имеет гауссову форму:



**Рис. 1.** Схема слоя жидкости с взвешенной частицей:

1 — лазерное излучение; 2 — малая сферическая частица

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right),$$

где  $I$  — интенсивность излучения в точке  $r$  в момент времени  $t$ ;  $I_0$  — интенсивность на оси лазерного излучения;  $\tau$  — характерная длительность излучения;  $r_0$  — характерный радиус пучка лазерного излучения.

Для описания импульсного термооптического возбуждения звука в жидкостях можно использовать следующее уравнение [5]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c_0^2 \Delta \varphi = \frac{\beta \alpha I_0}{\rho c_p} \operatorname{div} \langle \mathbf{S} \rangle,$$

где  $\varphi$  — полярный потенциал поля скоростей;  $c_0$  — скорость распространения звука в среде;  $\Delta$  — оператор Лапласа;  $\beta$ ,  $c_p$  — коэффициенты линейного расширения и удельной теплоемкости жидкости;  $\alpha$  — показатель поглощения среды;  $\rho$  — плотность;  $\langle \mathbf{S} \rangle$  — усредненная по периоду осцилляций электромагнитного излучения интенсивность излучения в среде.

Процесс возникновения акустических колебаний в линейном приближении описывается уравнением

$$\frac{1}{c_2^0} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \Delta \varphi = \frac{\beta \alpha I_0}{\rho c_p} \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right). \quad (1)$$

Граничные условия для уравнения (1) имеют вид

$$\begin{aligned} \varphi(r, 0) &= \varphi_0(r); \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t}(r, 0) &= \dot{\varphi}_0(r); \\ \frac{\partial \varphi}{\partial r}(0, t) &= 0; \\ \left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{2r}\right) \varphi &= v_1. \end{aligned} \quad (2)$$

На частицы, расположенные в акустическом поле, действует сила, индуцированная излучением. Для определения средней силы, действующей на частицу в произвольном акустическом поле, вводится потенциал сил

$$F = -\nabla U, \quad U = U(r). \quad (3)$$

Причем

$$U = 2\pi r_s^3 \rho_s \left( \frac{\bar{p}_n^2}{3\rho^2 c_s^2} f_1 - \frac{\bar{v}_n^2}{2} f_2 \right). \quad (4)$$

Здесь  $r_s$  — радиус частицы;  $\rho_s$  — плотность частицы;  $c_s$  — скорость распространения звука в материале частицы;  $\overline{p_n^2}$ ,  $\overline{v_n^2}$  — средние значения квадрата колебаний давления и скорости в волне в точке нахождения частицы;  $f_1, f_2$  — постоянные, определяемые физическими параметрами среды и частицы,

$$f_1 = 1 - \frac{c_0^2 \rho}{c_s^2 \rho_s}; \quad f_2 = 2 \frac{\rho_s - \rho}{2\rho_s + \rho}.$$

Для более компактной записи используют усредненные по времени величины

$$\overline{V_n} = \frac{1}{2} \rho \overline{v_n^2}; \quad \overline{T_n} = \frac{1}{2} \frac{1}{\rho c_0^2} \overline{p_n^2},$$

следовательно, уравнение (4) можно записать в виде

$$U = 2\pi r_s^3 \left( \frac{2}{3} f_1 \overline{T_n} - f_2 \overline{V_n} \right), \tag{5}$$

а уравнение для вычисления силы, действующей на частицу, будет выглядеть следующим образом:

$$F = 2\pi r_s^3 \left( \frac{2}{3} f_1 \mathbf{F}_1 - f_2 \mathbf{F}_2 \right), \tag{6}$$

где  $\mathbf{F}_1 = -\nabla \overline{T_n}$ ;  $\mathbf{F}_2 = -\nabla \overline{V_n}$ .

**Разностная схема.** В качестве численного метода решения задачи (1), (2) используем метод конечных разностей. Это численный метод решения дифференциальных уравнений, основанный на замене области непрерывного изменения аргументов, например,  $r$  и  $\tau$ , конечным множеством точек, называемых сеткой; вместо функций непрерывного аргумента рассматривают функции дискретного аргумента, определенные в узлах сетки и называемые сеточными функциями. Производные, входящие в дифференциальное уравнение, заменяют с помощью соответствующих разностных отношений.

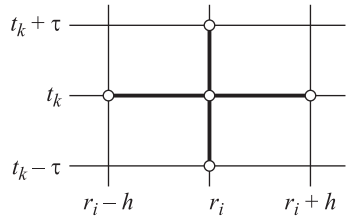


Рис. 2. Шаблон разностной схемы

Введем двумерную разностную сетку типа «крест» (рис. 2) с шагом  $h$  по радиальной переменной  $r$  и с шагом  $\tau$  по времени [6].

Составим разностную схему с «направленными разностями»

$$\frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2} + r_+(x_i) \frac{y_{i+1} - y_i}{h} + r_-(x_i) \frac{y_i - y_{i-1}}{h} = -f_i.$$

Здесь  $y_k, k=i, (i \pm 1)$  — значения сеточной функции  $y$  в пространственных точках  $x_k$ ;  $\frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h^2}$  — разностная аппроксимация второй пространственной производной.

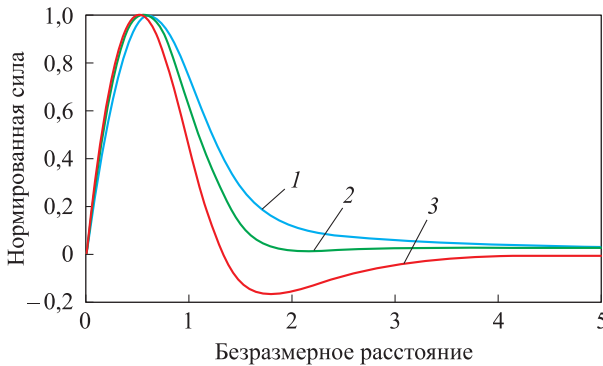
ственной производной;  $\frac{y_{i+1} - y_i}{h}$ ,  $\frac{y_i - y_{i-1}}{h}$  — правая и левая разностные производные, выбранные для аппроксимации обычной пространственной производной.

Изменением порядка аппроксимации этой разностной схемы и некоторых преобразований, приходим к монотонной при любых  $\tau$  и  $h$  схеме в виде

$$\left( \frac{2\gamma_i}{h^2} + \frac{r_+(x_i)}{h} - \frac{r_-(x_i)}{h} \right) y_i = \left( \frac{\gamma_i}{h^2} + \frac{r_+(x_i)}{h} \right) y_{i+1} + \left( \frac{\gamma_i}{h^2} + \frac{r_+(x_i)}{h} \right) y_{i-1} + f_i,$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{1}{2}|r(x_i)|}.$$

**Результаты анализа.** Для расчетов силы, действующей на частицу, использовали формулы (3), (5) и (6). Проведено исследование зависимости действующей на частицу силы от характерного параметра лазерного излучения, а именно, от радиуса пучка лазерного импульса  $r_0$ . В работе радиус  $r_0$  варьируется в пределах  $1 \cdot 10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-4}$  м. Пространственное распределение нормированной силы при различных значениях безразмерной длительности импульса приведено на рис. 3.



**Рис. 3.** Пространственное распределение силы при значениях безразмерной длительности импульса 1,875 (1), 3,75 (2) и 7,5 (3)

**Обсуждение результатов.** Анализ кривых, приведенных на рис. 3, позволяет сделать выводы, которые помогут оптимизировать применение оптико-акустического пинцета. При увеличении расстояния от центра лазерного пятна происходит возрастание нормированной силы до некоторого максимального значения, затем начинается ее уменьшение. При определенных значениях безразмерной длительности импульса происходит изменение знака силы на противоположный, а в промежутке существует область, называемая областью удержания частицы. Эта область представляет особый интерес для практического применения пинцета. Для некоторых значений безразмерной длительности импульса не наблюдается изменения знака силы воздействия. Подобные различия

в пространственном распределении силы делают необходимым предварительное математическое моделирование процесса. При дальнейшем увеличении расстояния кривая постепенно стремится к нулю.

Следует отметить, что при изменении безразмерной длительности импульса меняется не только положение области удержания, но и координата, соответствующая максимальному значению силы усредненного воздействия. Таким образом, структура поля силового воздействия на частицу позволяет перемещать частицы в пространстве и выполнять сложные операции по позиционированию частиц. Существенным является наличие области удержания, позволяющей фиксировать частицы с определенными параметрами в пространстве. Кроме того, становится возможным выполнение таких операций с микро- и наночастицами, как их сортировка по массе и размерам.

Наконец, с позиции практики очень важна зависимость параметров воздействия пинцета на частицы от комбинации параметров лазерного излучения, входящих в выражение для безразмерной длительности импульса. Это позволит добиваться необходимых параметров воздействия, варьируя параметры имеющегося у исследователей лазерного оборудования.

**Выводы.** Для достижения необходимого эффекта воздействия пинцета на частицу необходим правильный выбор параметров лазерного излучения. Варьируя параметры излучения можно изменять характеристики перемещения частицы.

Согласно результатам проведенного анализа, изменяя радиус пучка лазерного излучения можно достигнуть требуемого воздействия на частицу и, тем самым, управлять ее перемещением в жидкой среде. Следует отметить, сила воздействия существенно зависит от материала частицы. Так, максимальная сила воздействия, например, на золотую частицу достигается при радиусе пучка лазерного излучения  $r_0 = 5,5 \cdot 10^{-5}$  м и длительности лазерного импульса  $\tau_0 = 5 \cdot 10^{-5}$  с.

Разработанную модель можно применять для выбора оптимальных параметров лазерного излучения, необходимого как для манипуляции живыми объектами (клетками и их органеллами), так и объектами неживой природы, например, заряженными коллоидными частицами в растворах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Zharov V.P., Malinsky T.V., Alekhnovich V.I. Photoacoustic manipulation of particles and cells // Rev. Sci. Instrum. 2003. Vol. 74. P. 779–781. DOI: 10.1063/1.1523134
2. Svoboda K., Block S.M. Biological applications of optical forces // Ann. Rev. Biophys. Biomol. Struct. 1994. Vol. 23. P. 247–285. DOI: 10.1146/annurev.bb.23.060194.001335
3. Singlemolecule biomechanics with optical methods / A.D. Mehta, M. Rief, J.A. Spudich, D.A. Smith, R.M. Simmons // Science. 1999. Vol. 283. No. 5408. P. 1689–1695. DOI: 10.1126/science.283.5408.1689
4. Мельников Д.М., Шиганов И.Н. Исследование технологических сред методом лазерного фазового анализа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 4. С. 100–108. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-4-100-108

5. Гусев В.Э., Карабуттов А.А. Лазерная оптоакустика. М.: Наука, 1991. 304 с.
6. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения задач математической физики. М.: ЛКИ, 2007. 478 с.

**Лоскутникова Мария Леонидовна** — студентка кафедры «Математическое моделирование» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Якимова Мария Анатольевна** — ассистент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Алехнович Валентин Иванович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Лоскутникова М.Л., Якимова М.А., Алехнович В.И. Оптико-акустический пинцет для манипулирования микрочастицами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 5. С. 47–53. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-5-47-53

## OPTO-ACOUSTIC TWEEZERS TO MANIPULATE MICROPARTICLES

M.L. Loskutnikova

M.A. Yakimova

V.I. Alekhovich

vial@bmstu.ru

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

---

### Abstract

The study tested the impact of opto-acoustic tweezers onto a microparticle. We analyzed the laser radiation parameters effect, namely, the spot radius and pulse duration, on the averaged action force of the photoacoustic wave per particle. Moreover, we identified the optimum parameters of exposure on polystyrene particles

### Keywords

*Opto-acoustic tweezers, manipulation of microparticles, finite difference method*

Received 02.11.2016

© BMSTU, 2017

---

## REFERENCES

- [1] Zharov V.P., Malinsky T.V., Alekhovich V.I. Photoacoustic manipulation of particles and cells. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, vol. 74, pp. 779–781. DOI: 10.1063/1.1523134
- [2] Svoboda K., Block S.M. Biological applications of optical forces. *Ann. Rev. Biophys. Biomol. Struct.*, 1994, vol. 23, pp. 247–285. DOI: 10.1146/annurev.bb.23.060194.001335
- [3] Mehta A.D., Rief M., Spudich J.A., Smith D.A., Simmons R.M. Singlemolecule biomechanics with optical methods. *Science*, 1999, vol. 283, no. 5408, pp. 1689–1695. DOI: 10.1126/science.283.5408.1689

[4] Mel'nikov D.M., Shiganov I.N. Research into process fluids using laser phase analysis. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2015, no. 4, pp. 100–108 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2015-4-100-108

[5] Gusev V.E., Karabutov A.A. *Lazernaya optoakustika* [Laser optoacoustics]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 304 p.

[6] Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. *Chislennyye metody resheniya zadach matematicheskoy fiziki* [Numerical methods for solving problems of mathematical physics]. Moscow, LKI Publ., 2007. 478 p.

**Loskutnikova M.L.** — student of Mathematical Simulation Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Yakimova M.A.** — Assistant of Laser Technologies in Mechanical Engineering Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Alekhnovich V.I.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Laser and Optoelectronic Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Loskutnikova M.L., Yakimova M.A., Alekhnovich V.I. Opto-Acoustic Tweezers to Manipulate Microparticles. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 5, pp. 47–53.

DOI: 10.18698/0236-3933-2017-5-47-53