

Захват и перемещение твердых частиц с использованием закрученного ультразвукового пучка

В. Г. Андреев,^{*} М. В. Лесик,[†] С. И. Соловьев[‡]

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 06.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Решена задача захвата и перемещения в жидкости твердых сферических частиц ультразвуковым пучком, сформированным 8-элементной антенной решеткой. Формулируются требования к конфигурации ультразвукового поля и его интенсивности для захвата и удержания частиц заданного радиуса и плотности. Приведены измерения акустической мощности, излучаемой отдельными элементами решетки и показано, что амплитуда колебательной скорости может быть достаточной для захвата и удержания в воде полистереновых частиц субмиллиметрового размера.

PACS: 43.25.+y

УДК: 534.29

Ключевые слова: акустический пинцет, бесконтактная манипуляция, радиационная сила, захват частиц.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие биотехнологий и медицины стимулирует исследования по разработке и созданию новых методов манипулирования биологическими микрообъектами (клетками) без механического контакта с ними. Перспективными направлениями в этой области являются оптические и акустические пинцеты, которые позволяют захватывать и удерживать микрообъекты без прямого механического воздействия. Принцип действия оптического пинцета основан на эффекте возникновения радиационной силы при преломлении светового пучка на оптически прозрачном микрообъекте [1]. Световой луч фокусируется на объект, изменяет свое направление за счет разницы показателя преломления среды и объекта, в результате чего происходит изменение импульса светового луча и генерация радиационной силы, втягивающей объект в область фокуса. Оптические пинцеты способны развивать силы порядка долей нН и захватывать прозрачные объекты размером порядка микрона. Акустические пинцеты по принципу работы сходны с оптическими, но имеют ряд особенностей. Акустические пинцеты могут быть использованы для манипулирования непрозрачными объектами в оптически непрозрачных средах [2]. Поскольку радиационная сила со стороны волны прямо пропорциональна интенсивности волны и обратно пропорциональна скорости ее распространения в среде, то при одинаковой интенсивности сила, развиваемая акустическим пинцетом на 5 порядков превосходит силу, создаваемую оптическим пинцетом.

Принцип действия акустического пинцета основан на возникновении радиационной силы, действующей на частицу, помещенную в акустическое поле. Если структура акустического поля такова, что в нем при-

сутствуют локальные минимумы потенциальной энергии, то в таком поле можно захватить и удерживать частицу. Для этого могут быть использованы многоэлементные излучатели различных конфигураций. В работе [3] исследуется возможность удержания частицы закрученным пучком, созданным 4-х элементным излучателем в виде квадратной решетки, диагональные элементы которой излучают в противофазе. Недостатком указанной конфигурации является отсутствие фокусировки пучка и малое число элементов в решетке, что не позволяет менять топологический заряд закрученности пучка. В настоящей работе исследуется возможность захвата частиц закрученным акустическим пучком, создаваемым в пространстве решеткой, состоящей из 8 пьезоэлектрических преобразователей, расположенных на конической поверхности.

1. СОЗДАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ПУЧКА

Для захвата и перемещения микрочастиц в пространстве создается закрученный акустический пучок, на оси которого образуется минимум акустического давления. Для создания такого пучка излучающие элементы располагаются на конической поверхности по кругу симметрично относительно центра, и акустические волны, излучаемые соседними элементами сдвинуты по фазе на фиксированный угол (рис. 1). Радиус основания конуса, на котором расположены преобразователи 40 мм, высота конуса 23 мм, диаметр каждого преобразователя 14 мм, толщина — 2 мм. Частота излучения 1.07 МГц выбиралась вблизи резонансов отдельных пьезопреобразователей.

Ультразвуковой закрученный пучок с топологическим зарядом $m = 1$ создавался при сдвиге фаз волн, излучаемых от соседних пар преобразователей, равном 90° (рис. 2,а). При сдвиге фаз, равном 45° , полное изменение фазы при обходе всех преобразователей составляет 720° , что соответствует топологическому заряду $m = 2$ (рис. 2,б). Знак топологического заряда

^{*}E-mail: andreev@acs366.phys.msu.ru

[†]E-mail: marusya_12-95@mail.ru

[‡]E-mail: adress_2009@mail.ru

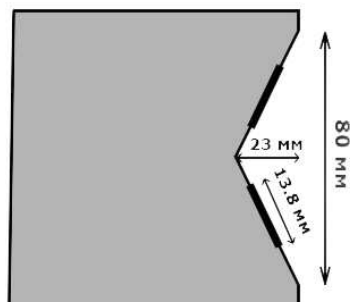


Рис. 1: Схема расположения элементов на поверхности конусного излучателя и его фотография

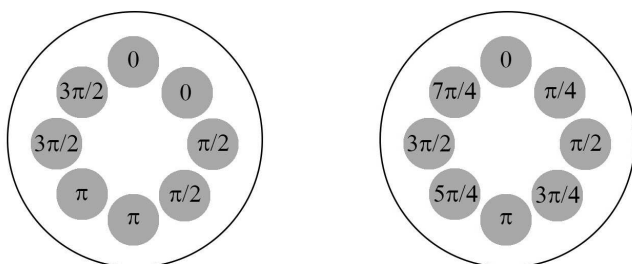


Рис. 2: Распределение сдвига фаз волн, излучаемых преобразователями при топологическом заряде: а — $m=1$ и б — $m=2$

меняется на противоположный при изменении направления обхода в левую сторону.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Расчет пространственного распределения акустического давления излучателя был выполнен на основе интеграла Рэлея:

$$p(\mathbf{r}, t) = -\frac{i\rho_0 v_n \omega}{2\pi} e^{-i\omega t} \int \frac{e^{ikR}}{R} dS,$$

где ρ_0 — плотность среды, ω — частота волн, R — расстояние от точки наблюдения с координатой $\mathbf{r}$ до текущей точки на поверхности излучателя, $k = \omega/c$ — волновое число, v_n — нормальная компонента амплитуды колебательной скорости на поверхности каждого из излучателей. Значение v_n считалось одинаковым для всех преобразователей и оно задавалась равным 0.1 м/с. На рис. 3,а показано распределение амплитуды акустического давления в области 4х4 мм в плоскости, перпендикулярной оси на расстоянии 50 мм от вершины конической поверхности. Эту плоскость в дальнейшем будем называть центральной. На указанном расстоянии (50 мм) оси излучателей пересекаются. Как

видно из графика, в центре акустического пучка образуется область минимума акустического давления. С увеличением расстояния от центра давление увеличивается и достигает максимального значения 3 атм на расстоянии $r = 0.75$ мм. Затем давление начинает уменьшаться и достигает минимума при $r = 1.8$ мм.

Расчет потенциала полистироновой сферической частицы радиуса $a = 170$ мкм в воде частицы в акустическом поле произведен с помощью формулы Горькова [4]:

$$U = \frac{\pi a^3}{\rho_0 c_0^2} \left(\frac{1}{3} f_1 p^2 + \frac{1}{2k^2} f_2 |\nabla p|^2 \right)$$

$$f_1 = 1 - \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho c^2}$$

$$f_2 = 2 \frac{\rho - \rho_0}{2\rho + \rho_0}$$

где ρ_0 — плотность среды, ρ — плотность частицы, c_0 — скорость звука в среде, c — скорость звука в частице, a — радиус частицы, p — акустическое давление в данной точке.

На рис. 3,б показано распределение потенциала частицы радиуса 170 мкм в области 4х4 мм в центральной плоскости. На оси пучка образуется потенциальная яма, в которой полистироновая частица может быть захвачена. Диаметр потенциальной ямы примерно равен 1.6 мм и соответствует расстоянию между первыми максимумами потенциальной энергии. Сила, действующая на частицу вычислялась из соотношения $\mathbf{F} = -\nabla U$. На рис. 3,в показано распределение модуля радиационной силы, действующей на частицу в области 4х4 мм в центральной плоскости. В области диаметром 0.8 мм сила направлена к центру. Вес частицы в воде с учетом выталкивающей силы $F_g = 1.61 \times 10^{-8}$ Н. Как видно из рис. 3,в, максимальная сила действующая на частицу на расстоянии 0.4 мм от центра, превосходит ее вес на 2 порядка, поэтому частица может быть захвачена в ловушку и удержана в ней закрученным акустическим пучком.

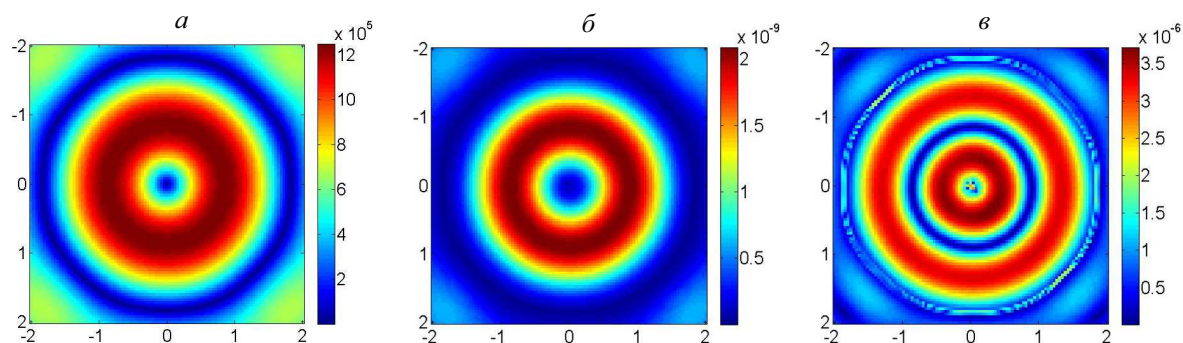


Рис. 3: Распределение амплитуды акустического давления в Па (а), потенциала полистиреновой частицы радиуса 170 мкм в Дж (б), модуля радиационной силы, действующей на частицу (в) в центральной плоскости при амплитуде колебательной скорости на преобразователях 0.1 м/с. Размеры указаны в мм. Топологический заряд $m = 2$

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Был создан прототип 8-ми элементного излучателя, описанного выше и проведены измерения излучаемой акустической мощности отдельными преобразователями методом взвешивания. Метод взвешивания акустического пучка заключается в измерении радиационного давления, оказываемого пучком на поглотитель. Поглотитель располагался на платформе, масса которой измерялась электронными весами Dumont Precisa с погрешностью 10 мг. Над поглотителем, на расстоянии 50 мм помещался излучатель. В процессе проведения измерений платформа, поглотитель и излучатель находились в отстоявшейся воде без пузырьков воздуха. Ось преобразователей составляла с вертикальной осью угол 23° . На весы действовала нормальная компонента радиационной силы, равная $F_n = F_r \times \cos 23^\circ = 0.92 F_r$. Измерялась сила $F_n = mg$, и затем определялась радиационная сила $F_r = 1.087 \times mg$. Полная акустическая мощность $W = F_r \times c_0$, где c_0 — скорость звука в воде.

Колебательная скорость на поверхности преобразователей вычислялась из соотношения: $v_n = \sqrt{\frac{2W}{S\rho_0 c_0}}$, где S — площадь поверхности преобразователя. На рис. 4 приведены измеренные зависимости амплитуды колебательной скорости на поверхности преобразователей (номера) от двойной амплитуды напряжения U_{pp} . Все преобразователи возбуждались на одной и той же частоте 1.07 МГц. Прямые линии проведены по методу МНК.

Амплитуду колебательной скорости на излучателях можно подстраивать путем изменения амплитуды возбуждающего напряжения. В качестве примера показано, что для получения амплитуды $v_n = 0.1$ м/с необходимо изменять амплитуду напряжения в диапазоне от 85 В (№ 7) до 130 В (№ 8).

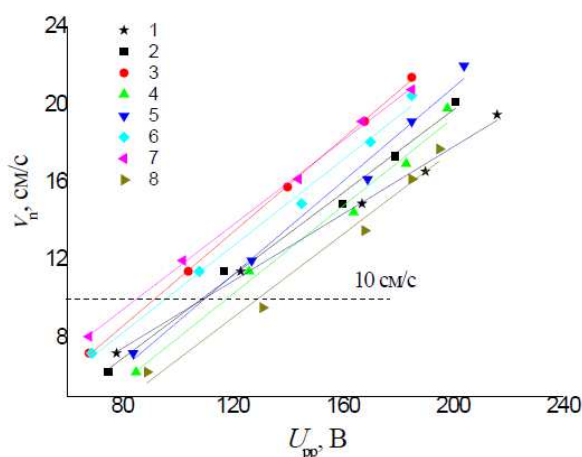


Рис. 4: Зависимости амплитуды колебательной скорости на поверхности преобразователей (номера) от двойной амплитуды напряжения. Измерения показаны символами, прямые проведены по методу МНК

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен акустический пинцет, состоящий из 8 плоских пьезоэлектрических преобразователей, расположенных на конической поверхности. Излучение соседних преобразователей сдвинуто по фазе так, чтобы при обходе всех преобразователей полный набег фазы составил 360° или 720° . В этом случае в пространстве формируется закрученный ультразвуковой пучок. Структура поля в области пересечения пучков имеет минимумы потенциальной энергии, в которые могут быть захвачены твердые частицы. Наиболее глубокая потенциальная яма формируется вблизи оси пучка. Величина радиационной силы зависит от амплитуды давления на отдельных преобразователях. В случае, когда все преобразователи излучают волны одинаковой амплитуды, в области на оси пучка с попе-

речным и продольным размерами порядка 1 мм и 10 мм соответственно, возможен захват и удержание полистереновых частиц с размерами в доли мм. Для этого амплитуда колебательной скорости на поверхности преобразователей должна быть порядка 0.1 м/с. Пока-

зано, что такие условия излучения могут быть созданы в рассмотренной конструкции излучателя путем подбора амплитуды возбуждающего напряжения.

Работа поддержана Фондом Содействия Инновациям по программе УМНИК.

-
- [1] *Ashkin A., Dziedzic J.M., Bjorkholm J.E., Chu S.* Opt. Lett. 1986. **11**, P. 288.
[2] *Marx V.* Nature. 2015. **12**, N 1. P. 41.
[3] *Shih-Tsung Kang, Chih-Kuang Yeh.* IEEE Trans.

- Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2010. **57**, N 6. P. 1451.
[4] *Горьков Л.П.* Докл. АН СССР. 1961. **140**, № 1. С. 88.

Trap and movement of solid particles with use of vortex ultrasonic beam

V. G. Andreev^a, M. V. Lesik^b, S. I. Soloviyov^c

*Department of acoustics, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.
E-mail: ^aandreev@acs366.phys.msu.ru, ^bmarusya_12-95@mail.ru, ^cadress_2009@mail.ru*

The problem of trapping and moving in a liquid of solid spherical particles by an ultrasonic beam formed by the 8-element antenna array is solved. Requirements are formulated for the configuration of the ultrasonic field and its intensity for trapping and retaining particles of a given radius and density. Measurements of the acoustic power emitted by individual elements of the array are given and it is shown that the amplitude of the vibrational velocity can be sufficient to trap and retain in water the polystyrene particles of submillimeter size.

PACS: 43.25.+y

Keywords: acoustic tweezer, non- contact manipulation, radiation force, trapping of the particles.

Received 06 July 2017.

Сведения об авторах

1. Андреев Валерий Георгиевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: andreev@acs366.phys.msu.ru.
 2. Лесик Мария Владимировна — студент 4 курса, тел.: (495) 939-29-52, e-mail: marusya_12-95@mail.ru.
 3. Соловьев Сергей Игоревич — студент 4 курса, тел.: (495) 939-29-52, e-mail: adress_2009@mail.ru.
-