

## ПЕРЕМЕЩЕНИЕ МИКРОЧАСТИЦ В ПРОСТРАНСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ РЕШЕТКИ

Андреев В.Г., Соловьев С.И.

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова  
г. Москва, Россия, E-mail: andreev@acs366.phys.msu.ru

Создание биологических тканей, и в последующем целых органов, является одной из основных задач биоинженерии. При этом требуется проводить прецизионные манипуляции с микрообъектами типа отдельных клеток бесконтактным способом. Второй аспект данной проблемы связан с необходимостью перемещения микро- и наночастиц в мягких тканях для обеспечения направленной доставки лекарств и последующего их высвобождения в опухолевой ткани. Применение ультразвука для захвата микрочастиц и их перемещения в заданное положение в пространстве является перспективным направлением исследований.

В докладе рассматривается задача захвата твердых сферических частиц сфокусированным ультразвуковым пучком, сформированным многоэлементной антенной решеткой и последующим перемещением микрочастиц в жидкости. Формулируются требования к конфигурации ультразвукового поля и его интенсивности для захвата и удержания частиц заданного радиуса и плотности.

Расчеты проводились для 128-элементной антенной решеткой, имеющейся в лаборатории Медлаб ННГУ и подробно описанной в [1]. Элементы в виде круглых пластинок диаметром 10 мм расположены на сферической поверхности по спирали Архимеда (рис. 1а). Радиус кривизны чаши и ее внешний диаметр одинаковы и равны 150 мм (рис. 1б). Внутри чаши имелось технологическое отверстие диаметром 44 мм, куда вставлялась диагностическая ультразвуковая решетка для построения изображений (В-сканов) и визуализации смещений частиц.

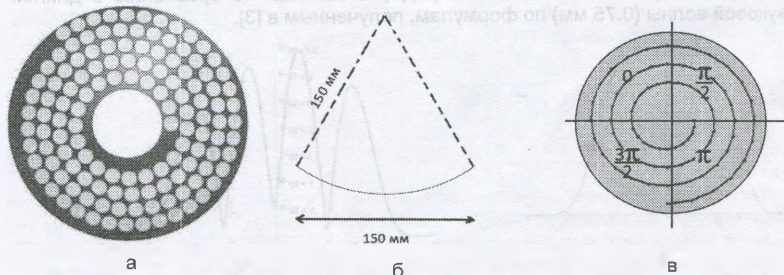


Рисунок 1 – Схема расположения излучающих элементов по спирали Архимеда (а), размеры решетки (б), распределение сдвига фаз колебательной скорости элементов на поверхности решетки (в)

Для захвата и удержания микрочастиц формировался вихревой пучок с нулевым значением амплитуды давления на оси [2]. Для этого излучатель делился на 4 равных сектора, и фаза колебательной скорости элементов, находящихся в пределах одного сектора, задавалась одинаковой. Элементы в соседних секторах колебались со сдвигом фазы, кратном 90 градусам (рис. 1в). В расчетах предполагалось, что полный сдвиг фазы при обходе всех секторов составлял 360 градусов, что соответствовало значению топологического заряда, равного единице. Расчеты ультразвукового поля такой решетки в воде выполнялись с использованием интеграла Рэлея. Частота излучения – 2МГц соответствовала резонансной частоте пьезокерамических элементов, амплитуда колебательной скорости на поверхности отдельного элемента – 10 см/с. На рисунке 2 представлено распределение амплитуды ультразвукового

давления в фокальной плоскости излучателя, находящейся на расстоянии  $z=150$  мм от поверхности решетки.

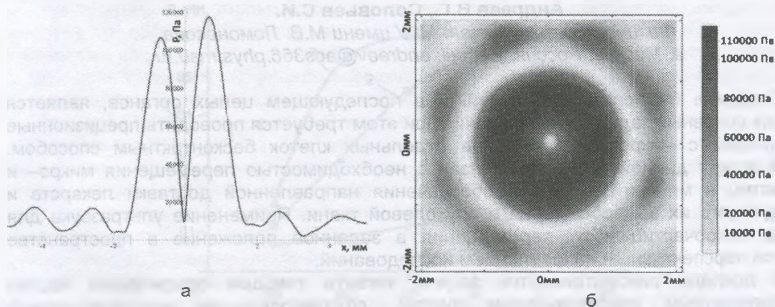


Рисунок 2 – Рассчитанная зависимость амплитуды ультразвукового давления от поперечной координаты в фокальной плоскости  $z=150$  мм (а). Двумерное распределение амплитуды давления в фокальной плоскости решетки (б)

Амплитуда давления на оси ( $x=0$ ) мала, но отлична от нуля в виду неполной симметрии расположения излучателей. Максимум амплитуды наблюдается на расстоянии порядка 1 мм, т.е. размер области, где может быть захвачена микрочастица составляет порядка 2 мм.

В качестве примера проведен расчет для полистиреновой частицы с параметрами: плотность –  $1.08 \text{ г/см}^3$ , скорость звука –  $2350 \text{ м/с}$ , радиус –  $170 \text{ мкм}$ . Потенциал частицы в ультразвуковом поле и силы, действующие на нее, рассчитывались в приближении малости радиуса частицы по сравнению с длиной ультразвуковой волны ( $0.75 \text{ мм}$ ) по формулам, полученным в [3].

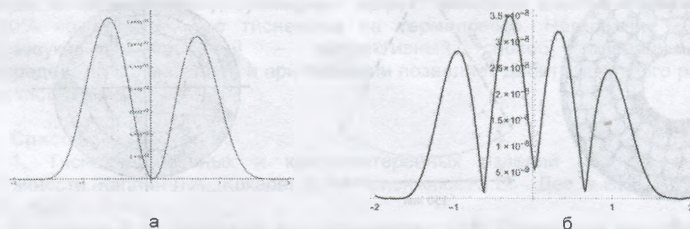


Рисунок 3 – Распределение потенциала микрочастицы в фокальной плоскости решетки в зависимости от поперечной координаты (а). Зависимость модуля силы, действующей на микрочастицу в поперечном направлении (б)

Распределение потенциала микрочастицы в фокальной плоскости решетки имеет минимум на оси решетки. Частице, находящейся в такой потенциальной яме, требуется дополнительная энергия, превышающая значение локальных максимумов, чтобы выйти за пределы ямы. Значение модуля силы, действующей на частицу в поперечном направлении, составляет десятки нН, что превышает вес частицы в воде ( $16 \text{ нН}$ ). Таким образом, частица таких размеров может быть удержана в потенциальной яме вблизи фокальной плоскости.

Частица в поле в начальный момент времени, до включения ультразвука, может двигаться произвольным образом относительно пучка, формирующего ловушку. В работе представлены рассчитанные траектории микрочастицы в зависимости от величины начальной скорости и ее направления относительно оси решетки. Показано, что частицы, находящиеся в пределах 2 мм от оси пучка и движущиеся с начальными скоростями, не превышающими  $5 \text{ см/с}$ , могут быть захвачены в ловушку. Скорость их

дальнейшего перемещения в ловушке при электронном смещении фокуса решетчатки также не должна превышать 5 – 8 см/с.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-13-10145.

**Список литературы:**

1. K.P. Morrison, G.W. Keilman, P.J. Kaczowski. Single Archimedean spiral close packed phased array HIFU. Proceedings 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium. – 2014.– pp. 400–404.
2. D. Baresch, J.–L. Thomas, R. Marchiano. Spherical vortex beams of high radial degree for enhanced single–beam tweezers. J. Appl. Phys. – 2013. –Vol. 113. – p. 184901.
3. Л. П. Горьков. О силах, действующих на малую частицу в акустическом поле в идеальной жидкости. Докл. АН СССР. –1961. – т.140, №1. – с. 88–91.