На правах рукописи



Росляков Сергей Николаевич

### УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ЛЕВИТАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОЙ ЧАСТИЦ В ПРОСТРАНСТВЕ

1.3.4. Радиофизика

Автореферат на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

#### Научный руководитель: доктор физико-математических наук Суханов Дмитрий Яковлевич

#### Официальные оппоненты:

Коношонкин Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория рассеяния электромагнитных волн, ведущий научный сотрудник

Солдатов Алексей Иванович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение электронной инженерии, профессор

Шарфарец Борис Пинкусович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук, лаборатория методов и приборов иммунного и генетического анализа, главный научный сотрудник

Защита состоится 27 декабря 2022 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.1.3.02», созданного на базе радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательский томский государственный университет» по адресу: 634045, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус № 11 ТГУ, аудитория 401).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Гомский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/04de23f1-e070-491b-98ca-dcda69460a4b

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » ноября 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Торгаев Станислав Николаевич

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. В настоящей работе предлагаются методы акустического захвата частиц и представлены результаты исследований явления акустической левитации в широкополосном ультразвуковом узкополосном И поле. Явление акустического захвата применимо для смешивания химических реактивов, 3D печати порошковыми материалами, технологических процессах обработки малоразмерных частиц. В последние время увеличилось количество работ, связанных с исследованиями акустической левитации и её применением. Известно применение левитации в качестве акустического пинцета с помощью узкополосного сигнала. Однако известные методы имеют ряд недостатков, связанных с фундаментальными физическими ограничениями. Например, акустические пинцеты захватывают частицы только в одной области, и не применимы для манипуляции упорядоченной группой частиц. Известные левитационные установки могут перемешать отдельные частицы в трёхмерном пространстве. Однако распределение управляющих частицами стоячих волн имеет сетчатую структуру из-за использования узкополосного сигнала, что приводит к тому, что существует одновременно множество узлов стоячих волн, где поддерживается левитация, в которые могут затягиваться частицы.

Первые работы, связанные с действием акустического поля на частицы, принадлежат Кингу и Горькову. Горьков предложил расчет радиационных сил, действующих на сферическую частицу в жидкости под действием монохроматического ультразвукового поля. Формулировка потенциала сил предложенная Горьковым до сих пор широко используется. Интерес к этой области проявляют различные группы ученых мира (A. Marzo, B. W. Drinkwater, M. A. B. Andrade, R. H. Morris, T. Fushimia). B простейшем случае захват частиц происходит при воздействии двух встречных монохроматических ультразвуковых волн с длиной волны, не менее чем в два раза превышающей размер частицы. В настоящее время разрабатываются различные варианты реализации установки для левитации, основанные на решетках, расположенных на различных геометрических поверхностях. Разработаны установки, в которой излучатели расположены на сегментах сферы. Метод акустической сортировки частиц различных размеров предложен авторами М. А. В. Andrade, G. D. Skotis. Сортировка основывается на управляемом изменении разности фаз встречных акустических волн при левитации в стоячей волне. Существуют также акустические пинцеты, которые позволяют манипулировать частицами размером порядка микрометра. Их конструкция создает высокочастотное сфокусированное акустическое поле, позволяющее захватывать частицы и удерживать их достаточно стабильно, чтобы при перемещении пинцета частица оставалась в точке фокусировки. Популярными вариантами

установок для акустического захвата являются системы с размещением решеток на гранях куба или на поверхности сферы. Частицы левитируют в стоячих волнах, образованных монохроматическим полем, и за счет изменения фазы встречных источников перемещаются в горизонтальной плоскости, в которой сфокусированы источники. Недостатком таких систем является использование монохроматического сигнала, что приводит к левитации частиц в периодической структуре. Обычно нежелательные частицы удаляются с помощью внешней акустической решетки или механически.

данной работе исследуются как узкополосные, B так И широкополосные сигналы для акустической левитации. В узкополосном поле рассматривается левитация группы частиц размерами меньше длины волны, так и объектов размерами много больше длины волны. Использование широкополосного сигнала позволит создать локализованную область левитации. Планируется реализовать функцию акустического пинцета с помощью решётки широкополосных ультразвуковых излучателей. Кроме того, предложенную технологию можно использовать для отклонения частиц, падающих по произвольным траекториям. Метод широкополосной акустической левитации предлагается применить в технологии трёхмерной печати порошковыми материалами. Технология трёхмерной печати основана на позиционировании частиц материала широкополосным ультразвуковым полем и их дальнейшего спекания. Также возможно использование предложенной технологии при изготовлении химических примесей, сортировки частиц или удаления пыли.

Цель работы: Разработка и исследование методов акустической левитации, манипуляции частицами и их группами в ультразвуковом поле.

Для достижения обозначенной цели были поставлены следующие задачи диссертационной работы:

• Проведение численного моделирования взаимодействия твёрдых тел и акустических полей в газообразных средах в ультразвуковом поле;

• Разработка метода управления отдельной частицей и группой частиц с применением монохроматического и широкополосного ультразвукового поля;

• Разработка акустической ловушки на основе вихревого сфокусированного поля;

• Экспериментальные исследования возможностей акустической левитации;

• Разработка метода 3D печати на основе акустической левитации.

#### На защиту выносятся следующие положения:

1 В монохроматическом поле встречно направленных излучателей ультразвуковых волн в воздухе обеспечивается захват и частиц, и прямолинейных объектов, укладывающихся в последовательность узлов стоячих волн;

2 Группировка частиц в единственном стабильном положении с возникновением сил, смещающих частицы к центру в ультразвуковом поле встречно направленных излучателей, обеспечивается с помощью применения противолежащих излучателей широкополосных сигналов с линейной частотной модуляцией одинаковых по форме, но противоположных по знаку; 3 В вихревом сфокусированном широкополосном ультразвуковом поле с линейной частотной модуляцией обеспечивается смещение частиц в центральную область и стабильный захват частицы в центральном узле.

Достоверность защищаемых положений. Достоверность полученных результатов подтверждается согласованностью математического моделирования и экспериментальных исследований. Кроме того, полученные результаты не противоречат с имеющимися физическими представлениями об акустической левитации.

#### Новизна исследования.

1 В монохроматическом поле встречно направленных излучателей ультразвуковых волн в воздухе впервые показана возможность захвата частиц и прямолинейных объектов, укладывающихся в последовательность узлов стоячих волн.

2 Исследована левитации частиц в широкополосном поле, продемонстрирована возможность группировки частиц в одно или несколько пятен фокусировки. Впервые исследован и разработан метод левитации частиц в широкополосном ультразвуковом поле.

3 Исследована левитация частиц для сигналов с линейной частотной модуляцией в вихревом поле. Продемонстрировано что сохраняется вихревой характер фазы волнового поля и обеспечивается стабильный единственный узел стоячих волн.

**Теоретическая значимость работы.** По результатам численных и аналитических расчетов показана возможность акустической левитации в широкополосном, узкополосном и вихревом поле.

**Практическая значимость результатов работы.** Разработаны методы бесконтактной манипуляции в трёхмерном пространстве частицами и прямолинейными объектами ультразвуковым полем, что применимо в технологиях сортировки, исследовании химических реакций, технологических процессах с малоразмерными объектами. Была разработана установка для нанесения частиц на поверхность в условиях акустической левитации (3D печать).

Апробация работы. Основные результаты и положения докладывались на следующих научных конференциях: 7-я Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2018); «Anglo-French Physical Acoustics Conference» (Surrey, UK, 2020); 9-я Международная научно-практическая конференция Актуальные проблемы радиофизики (Томск, 2021); 19 Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов (Томск, 2022); 27 Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР – 2022», посвященной 60-летию ТУСУРа (Томск, 2022).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 2 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 1 статья в зарубежном научном журнале, 1 статья в российском научном журнале, переводная версия которого входит в Scopus), 4 статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus, 1 статья в прочем научном журнале, 3 публикации в сборниках материалов международных и всероссийской научной, научно-практической и научнотехнической конференций; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

#### Личный вклад автора.

Представленные в диссертации результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. Соавторы, принимавшие участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. Личное участие соискателя состоит в проведении численного моделирования, участии в разработке и создании экспериментальных установок, проведение экспериментальных исследование, анализ и обработка полученных результатов. Определение направления исследований, выбор методов, постановка задач, интерпретация полученных результатов, подготовка и написание статей осуществлялось совместно с научным руководителем доктором физико-математических наук Сухановым Дмитрием Яковлевичем.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 71 наименование. Общий объем диссертации – 105 страниц. Работа содержит 56 рисунков и 1 таблицу.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность темы диссертационного исследования, поставлены цели и задачи, сформулированы защищаемые положения и показана их достоверность, представлены теоретическая и практическая значимость, отражена научная новизна, дано краткое описание и общая характеристика работы.

**В главе 1** проведен обзор литературы по теме диссертационного исследования. Показан вывод вычисления средних сил, который был предложен Львом Петровичем Горьковым в 1961 году, позже потенциал U для акустических сил  $F = -\nabla U$  получил название потенциал Горькова. В дальнейшем потенциал сил стал основой для описания теории акустического

захвата частиц и процессов коагуляции. Проведен анализ разработанных левитационных установок, показаны их достоинства и недостатки. Описанные методы позволяют захватывать частицы и манипулировать ими. Однако остаются открытыми вопросы, связанные с левитацией частиц размерами много большими длины волны, а так же возможность создания произвольного распределения акустических сил.

В главе 2 проводится математическое моделирование акустической левитации на основе потенциала Горькова. Проведено моделирование левитации частиц в трехмерном пространстве и их манипуляции. Разработан метод группировки частиц в структуру сложной формы, за счет использования широкополосного сигнала. Разработана модель акустической вихревой ловушки, способная затягивать частицы в область фокусировки.

Предлагается обеспечить стабилизацию положения левитирующих частиц в воздухе за счет формирования сетки локальных минимумов потенциала Горькова, распределенных на плоскости. Соответствующее распределение акустического поля обеспечивается интерференцией полей встречно направленных решеток излучателей при фокусировке поля вблизи плоскости левитации. Решетки ультразвуковых излучателей размещаются согласно схеме изображенной на рисунке 1. В каждой решетке по 320 элементов, размещенных в гексагональной сетке 16 рядов по 20 штук в каждом. Встречные решетки фокусируются на общую линию на заданной высоте  $z_0$  параллельную решеткам и проходящую посередине между ними.

Поле акустического давления, создаваемое сфокусированными решетками, задаётся выражением:

$$P(\mathbf{r}) = \sum_{n} \frac{\exp\left(ik\left[|\mathbf{r} - \mathbf{R}_{n}| - \sqrt{(x_{0} - X_{n})^{2} + (z_{0} - Z_{n})^{2}}\right]\right)}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{R}_{n}|} + \sum_{m} \frac{\exp\left(ik\left[|\mathbf{r} - \mathbf{R}'_{m}| - \sqrt{(y_{0} - Y'_{m})^{2} + (z_{0} - Z'_{m})^{2}}\right]\right)}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{R}'_{m}|}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{R}_n$  – координаты излучателей в решетках ориентированных параллельно плоскости YOZ (решетки YOZ);  $\mathbf{R'}_m$  – координаты излучателей в решетках ориентированных параллельно плоскости XOZ (решетки XOZ);  $x_0$  – координата линии фокусировки решеток YOZ по оси х;  $y_0$  – координата линии фокусировки решеток YOZ по оси х;  $y_0$  – координата линии фокусировки решеток XOZ по оси у;  $z_0$  – высота фокусировки для всех решеток.

Амплитуда акустического давления формируемого скрещенными стоячими волнами представлена на рисунке 2.



Рисунок 1 – Размещение решеток ультразвуковых излучателей



Рисунок 2 – Суммарное поле всех элементов (амплитуда акустического давления), создающих скрещенные стоячие волны

Проведено моделирование левитации частиц пенопласта (плотность 15 кг/м<sup>3</sup>) диаметром от 100 до 1000 мкм в ультразвуковом поле скрещенных стоячих волн на частоте 40 кГц в воздухе со скоростью звука 340 м/с. По вертикальной оси поле имеет огибающую приближённо в виде гауссоиды, что должно обеспечить левитацию в акустическом поле. Разработанная программа на основе технологии OpenCL позволила рассчитать положения 2048 частиц со случайным начальным распределением частиц (рисунок 3) и распределение частиц через 500 мс (рисунок 4). Левитация частиц в скрещенных стоячих волнах обеспечивает группировку частиц в узлах прямоугольной сетки.





Рисунок 4 – Распределение частиц через 500 мс

Следует отметить, что при размещении излучающих решеток, так как показано на рисунке 1 будут возникать многократные отражения от плоскостей решёток, что исказит поле первичных волн. Для минимизации поля рассеянного на решётках предлагается разместить излучатели на глубине в четверть длины волны в удерживающей пластине. Тогда поле, рассеянное от корпуса датчика будет складываться в противофазе с полем рассеянным на поверхности удерживающей пластины, что минимизирует амплитуду волны рассеянной на решётке в области левитации.

На рисунке 5 представлены результаты вычислений амплитуды прямого сфокусированного поля акустического давления от решётки излучателей, и поля рассеянного на решётке при заглублении излучателей. Видно, что прямое поле в среднем в 15 раз по амплитуде превосходит поле, рассеянное на встречной решётке. Для оценки эффекта от заглубления датчиков на четверть длины волны был проведён расчёт для случая, когда датчики не заглублялись. В результате, это приводит к увеличению амплитуды рассеянного поля в 2-3 раза, что видно на рисунке 5 график  $P_1$ .



P<sub>0</sub> – первичное поле решётки излучателей,
сфокусированное в центре (точечный пунктир), P<sub>1</sub> – поле, рассеянное на решётке без заглубления излучателей (широкая линия), P<sub>2</sub> – поле, рассеянное на решётке при заглублении излучателей на четверть длины волны (тонкая линия)



Рассмотрим конфигурацию, где использованы две противоположные излучающие решетки, излучающие элементы которых расположены в гексагональной сетке (рисунок 6). Элементы решетки подключаются параллельно к широкополосному источнику сигнала. Излучатели в решетках располагаются на поверхности сферы, так что обеспечивается фокусировка поля в центре. Сигнал, подаваемый на различные решетки, управляется отдельно. Фокусировка решеток достигается путем размещения излучающих элементов на поверхности сферы. Центр системы совпадает с фокусом ультразвукового поля. Из-за интерференции поля встречных решеток возникают стоячие волны с максимальным уровнем поля в центре. Предлагается подавать сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) с возрастающей частотой и формировать область стабильной левитации частиц при интерференции полей встречных антенн. Излучаемый сигнал задавался



Рисунок 6 – Конфигурация установки левитации на основе решеток сфокусированных излучателей

Поле сфокусированной решетки широкополосных излучателей рассчитывалось по формуле:  $P(\mathbf{r}) = \sum_{n} \frac{S\left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{R}_{n}| - |\mathbf{r}_{0} - \mathbf{R}_{n}|\right)}{|\mathbf{r} - \mathbf{R}_{n}|}$ . Поле

излучения сфокусированных решеток рассчитывалось для излучения ЛЧМ сигнала с полосой частот от 5 кГц до 40 кГц при T=2 мс. Такая широкая полоса частот при моделировании была выбрана для лучшей наглядности. Для численного моделирования использовались решетки, составленные из точечных источников, размещенные как показано на рисунке 6.

Если рассматривать амплитуду интерференционного поля как функцию времени (рисунок 7 б), то видно, что с увеличением времени узлы интерференционной картины смещаются в центральную область. Для визуализации время начала сигнала было сдвинуто на 0,6 мс, имея в виду, что сигнал ЛЧМ повторяется бесконечно. Через 1,4 мс происходит мгновенное изменение частоты сигнала с  $\omega_2$  до исходного значение  $\omega_1$ , так как сигнал ЛЧМ цикличен. Это приводит к нежелательному эффекту интерференции полей решеток, при котором узлы стоячих волн расходятся от центра. Однако этот процесс происходил довольно быстро, и частицы не должны успевать изменить свое положение. При следующем цикле увеличения частоты частицы попадают в другой локальный узел стоячей волны и снова дрейфуют к центру до тех пор, пока все частицы не переместятся в центральную область. Конечно, резкая перестройка частоты в конце цикла создает нестабильность в поведении левитирующих частиц. Дестабилизация частиц должна быть менее значительна, когда время нарастания частоты увеличивается. Если частица находится в центральном узле, то ее положение должно быть относительно стабильным даже при резком изменении частоты, так как центральный узел присутствует всегда и не меняет своего положения.



а – пространственное распределение
 амплитуды интерференционного поля
 встречных излучателей при t=0,8 мс

б – амплитуда поля вдоль оси
 фокуса х как функция времени

IPI

Рисунок 7 – Интерференционное поле противофазно-встречных сфокусированных излучателей широкополосных ЛЧМ сигналов

Расширим возможности широкополосной левитации и покажем принципиальную возможность формирования сложной области захвата частиц. Рассмотрим две плоские встречно-направленные решетки рисунок 8. Предполагается, что на каждой решетке размерами 200 мм на 200 мм расположены излучатели в заполненной сетке с шагом 5 мм. Каждый излучатель контролируется отдельно и способен излучать произвольный широкополосный сигнал в диапазоне частот от 20 до 40 кГц. Расстояние между решётками 200 мм.



широкополосном ультразвуковом поле

Зададим область фокусировки в виде скалярной двумерной функции M(x,y). Данная функция равна единице в точках, где требуется сосредоточить частицы, и равна нулю в точках, где не должно быть частиц. В излучателях необходимо создать такие сигналы, чтобы в ненулевых точках функции M(x,y) происходила фокусировка ультразвуковых полей. При этом сигналы сходящихся волн должны иметь вид сигналов с линейной частотной модуляцией.

Рассмотрим, как частный случай фокусировку поля в две различные точки  $r_1 = (25 \text{ mm}, 0, 0)$  и  $r_2 = (-25 \text{ mm}, 0, 0)$ . Рассматриваем диапазон частот сигнала с линейной частотной модуляцией  $f_1 = 20 \text{ к}\Gamma\mu$ ,  $f_2 = 40 \text{ к}\Gamma\mu$  с периодом T = 1 мс. На рисунке 9 показаны узлы и пучности стоячих волн в момент времени 0,5 мс, и векторная визуализация направления смещения частиц. Узлы стоячих волн отчётливо выражены. С ходом времени узлы стоячих волн стоячих волн стоячих волн смещаются в сторону точек фокусировки, что должно обеспечить постепенное перемещение частиц в заданные узлы стоячих волн в плоскости z = 0.





а– величина амплитуды
 акустического давления волнового поля, образованного плоскими
 решетками
 Рисунок 9 – Фокусировка поля в две области

Рассмотрим широкополосную акустическую вихревую ловушку для левитации частиц в воздухе на основе решетки излучателей, размещённой на сферическом поясе. Для создания вихревого поля излучатели сдвинуты по радиусу на долю длины волны пропорциональную азимутальному углу (угол  $2\pi$  соответствует увеличению радиуса на длину волны). В данном случае

рассматривается длина волны для центральной частоты широкополосного сигнала. На рисунке 10 представлено изображение предлагаемой решётки из 128 излучателей. Рассматривается сферический пояс размещения излучателей со средним радиусом 61 мм. Излучатели размещены так, чтобы разность фаз между первым и последним излучателем составляла  $2\pi$ . Такое размещение излучателей обеспечивает создание вихревого поля на центральной частоте.

Считаем, что все излучатели в решётке излучают одинаковый сигнал, излучатели имеют широкую диаграмму направленности, и, по сути, излучают сферические волны. Поле внутри сферического пояса, в линейном приближении, является суперпозицией полей каждого излучателя. Запишем результирующее поле акустического давления согласно решению волнового

уравнения в запаздывающих потенциалах: 
$$p(\mathbf{r},t) = \sum_{n} \sum_{m} A \cdot \frac{s\left(t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{R}_{n,m}|}{c}\right)}{4\pi |\mathbf{r} - \mathbf{R}_{n,m}|}$$
. В

качестве излучаемого сигнала s(t) рассмотрим циклически повторяемый широкополосный сигнал с линейной частотной модуляцией. Рассмотрим излучение сигналов с линейной частотной модуляцией в полосе частот 30-50 кГц с периодическим повторением в интервале времени 1 мс (рисунок 11). Минимальный радиус размещения излучателей составляет 57 мм, максимальный 65 мм. В результате в центре системы формируется устойчивый узел стоячих волн. В целом фазовое распределение поля имеет вихревой характер.



Рисунок 10– Размещение ультразвуковых излучателей в спиральной решётке и схематическая визуализация вихревого поля



Рисунок 11 – Поле излучения сигналов с линейной частотной модуляцией спиральной решётки в момент времени 0.5 мс при периоде повторения сигнала 1 мс

Глава 3 посвящена экспериментальным исследованиям акустической левитации в ультразвуковом поле. Проведенные экспериментальные исследования полностью подтвердили результаты математического моделирования.

В качестве ультразвуковых источников ультразвука использовались ультразвуковые приемо-передающие излучатели Murata MA40S4/S (рисунок 12). Излучатели обладают следующими характеристиками: диаметр 10 мм, диапазон рабочей частоты 38 - 44 кГц. В процессе эксплуатации ультразвуковых излучателей было выявлено, что они имеют различное сдвиг по фазе. Фаза сигналов может отличаться вплоть до  $\pm \pi$ . Разработано устройство для калибровки ультразвуковых излучателей на основе микроконтроллера STM32F429. Все используемые излучатели были проколиброваны и отсортированы с шагом в 7 градусов.

Разработана система 64-канального усилителя цифровым с управлением микроконтроллером для системы фазированных решеток, облучающих область ультразвуковой левитации частиц (рисунок 13). формируется бинарными Ультразвуковой сигнал выхолами микроконтроллера, фактически реализован 64-канальный 1-битный ЦАП. Двоичные сигналы проходят через полосовой фильтр, что позволяет получить практически синусоидальные сигналы, которые поступают на усилители TDA7297 (используется 32 двухканальные микросхемы). Предложенная схема позволяет управлять частотой и фазой излучаемого сигнала, которых должно быть достаточно для поддержания левитации.





Рисунок 12 – Ультразвуковые излучатели MA40S4/S

Рисунок 13 – Фотография 64-канального генератора с цифровым управлением и усилителями

Для экспериментальной проверки возможности левитации и управления упорядоченной группы частиц была разработана установка из 4-х решеток ультразвуковых излучателей (в каждой решетке 320 элементов) согласно схеме изображенной на рисунке 1. Элементы в решетках размещены в гексагональной сетке с шагом d = 11 мм в 16-и рядах, и в каждом ряду по 20 излучающих элементов. Излучающие элементы в одном ряду подключены параллельно и присоединены к выходу усилителя гармонического сигнала.

В один ряд устанавливались излучатели с различием фазы не более 7 градусов, но на соотношение фаз между соседними рядами ограничения не накладывались. Поскольку фаза сигнала в каждом ряду управляется цифровым способом (с шагом 5,6 градуса), то любые различия фаз излучаемых сигналов могут быть компенсированы после калибровки решеток. Калибровка решеток производилась с помощью приемного датчика, размещенного в центре системы. За счет регулировки разности фаз между встречными решетками обеспечивается перемещение левитирующих частиц по осям Х и У, поскольку минимумы стоячих волн смещаются, если меняется разность фаз встречных бегущих волн. Перемещение по оси Ζ обеспечивается за счет задания соответствующих фаз сигналов на все решетки.

В ходе эксперимента, после включения излучателей, в область левитации сверху засыпались частицы пенопласта неправильной формы с поперечными размерами не более 2 мм. Падающие частицы захватывались акустическим полем и начинали левитировать в прямоугольной сетке с шагом в половину длины волны (рисунок 14). При изменении разности фаз излучателей встречных решеток наблюдалось движение всей упорядоченной структуры левитирующих частиц по горизонтали. За счет перефокусировки решеток по высоте обеспечивалось перемещение всей структуры по оси Z.



Рисунок 14 – Фотографии экспериментальной установки, обеспечивающей левитацию и управление упорядоченной группы частиц пенопласта

Проведены эксперименты по проверке возможности левитации прямолинейных отрезков длиной много больше длины волны. В качестве исследуемых объектов для левитации были изготовлены отрезки из вспененного полистирола диаметром 2 мм и длиной 100 мм (при этом длина волны излучения составляет 8,5 мм), что составляет почти 12 длин волн. В результате наблюдалась левитация отрезков в ультразвуковом поле, сформированном встречно направленными сфокусированными решетками на частоте 40 кГц (рисунок 15). Устойчивая левитация наблюдалась при ориентации отрезка под углом 45 градусов к плоскости излучающих решёток (рисунок 15 а) и при ориентации отрезков параллельно или перпендикулярно излучающих решёток (рисунок 15 б), плоскостям что соответствует распределению локальных минимумов потенциала Горькова. Несмотря на то, что потенциал рассчитан для сферических частиц, его распределение позволило предсказать поведение прямолинейных отрезков.





а – левитирующий отрезок под углом б – левитирующие два отрезка вдоль
 45 градусов плоскостей решёток
 Рисунок 15 – Фотографии экспериментов по левитации продолговатых

объектов из вспененного полистирола

Проведены экспериментальные исследования левитации частиц в интерференционном поле встречных излучателей широкополосного сигнала. В экспериментах использовался ЛЧМ сигнал с частотой от 38 кГц до 44 кГц. Частицы пенопласта диаметром 0,5 +/- 0,3 мм использовались в качестве левитирующих объектов. Эксперименты проводились с двумя типами конфигурации излучателей с двумя и четырьмя решетками.

В системе из двух решеток каждая решетка состояла из 91 излучающего элемента типа MA40S4/S, размещенных в гексагональной сетке с шагом 11 мм на поверхности сферы радиусом 180 мм. Расстояние между решетками составляло 340 мм. Элементы одной решетки были соединены параллельно и присоединены к источнику сигнала с усилителем на микросхеме TDA7384A. Амплитуда сигнала, подаваемого на ультразвуковые излучатели, составляла 15 В. Сигналы формировались с помощью 8-битного двухканального цифро-аналогового преобразователя на микроконтроллере

STM32F407. Каждая решетка подключалась к отдельному каналу усилителя с отдельным каналом цифро-аналогового преобразователя. Использовались ЛЧМ сигналы, идентичные по форме, но противофазные в разных решетках. Одна решетка из 91 элемента обеспечивала акустическое давление 2 кПа в фокусе.

На фотографиях левитирующих частиц в поле двух противоположно направленных решеток видно, что выделяются три четкие локальные области левитации частиц (рисунок 16). Наиболее выраженной оказалась центральная область, что соответстветствует теоретическим оценкам. Изменяя задержку между излучаемыми сигналами встречных решеток, можно перемещать частицы вдоль оси фокуса. Временной сдвиг между излучением сигналов приводит к смещению интерференционной картины встречных излучателей, что позволяет сместить центральный узел стоячих волн.

На рисунке 17 представлена левитационная установка, состоящая из четырех излучающих решеток. Такая же схема использовалась при исследовании узкополосных волн. Система позволяет обеспечивать акустическое давление в центральной области до 1,3 кПа. В пространство между решетками вносятся частицы пенопласта. Частицы захватываются и перемещаются в центральную область. Изменяя временные задержки между сигналами встречных решеток, частицы перемещаются в горизонтальной плоскости по оси X или Y. Изменяя высоту фокусировки  $Z_f$ , осуществляется

изменение высоты левитирующих частиц. Таким образом, управление левитирующими частицами в трехмерном пространстве осуществляется под воздействием широкополосных ультразвуковых сигналов.



Рисунок 16 – Левитация частиц в интерференционном поле двух сфокусированных излучателей



Рисунок 17 – Левитация частиц в интерференционном поле четырех сфокусированных решеток

Для проверки возможности акустического захвата частиц в вихревом широкополосном акустическом поле была изготовлена экспериментальная установка на основе 128-и ультразвуковых излучателей MA40S4/S, расположенных в спиральной решётке. Все излучатели подключались к общему источнику сигналов. При излучении монохроматического сигнала на частоте 40 кГц частицы левитировали в концентрических кольцах узлов стоячих волн (рисунок 18). При излучении ЛЧМ сигнала с полосой частот от 38 кГц до 44 кГц частицы левитируют только в центральном узле (рисунок 19). В экспериментах применялись частицы пенопласта (плотность 15 кг/м<sup>3</sup>) размером порядка 1 мм. При использовании монохроматического сигнала возникает картина стоячих волн, расположенных на кольцах разного радиуса. В широкополосном поле частицы левитируют только в центральной области. Возникает картина стоячих волн на поверхности колец, аналогичная ситуации с монохроматическим сигналом. Однако кольца изменяют свой радиус и со временем смещаются в центральную область. Если частица изначально не попадает в центр, то она постепенно смещается в него, либо выбрасывается, если не попадает в один из узлов стоячих волн.



Рисунок 18 – Левитация частиц в монохроматическом поле на частоте 40 кГц



Рисунок 19 – Левитация частиц в широкополосном ультразвуковом поле с полосой частот 38-44 кГц

На основе анализа экспериментов по ультразвуковой левитации частиц и их инфракрасному нагреву была разработана схема трёхмерной приемлемую обеспечиваюшая скорость нанесения печати. частип. Предлагается разместить решётку ультразвуковых излучателей (рисунок 20) сверху над столом с формируемым объектом и подавать частицы сверху из одной точки в центре решётки рисунок. Стол с формируемым объектом закрепляется на специальной платформе, перемещаемой по вертикальной оси с помощью червячного механизма. По бокам находятся инфракрасные нагреватели границы объекта. Фотография нагрева верхней для разработанной экспериментальной установки представлена на рисунке 21. Чтобы реализовать оплавление только верхнего слоя формируемого объекта разработаны изготовлены эллиптические были И рефлекторы цилиндрического типа. В фокус рефлектора помещалась галогенная лампа мощностью 1000 Ватт (Лампа галогенная линейная TDM ЛГ-1000 Вт-R7s-189 мм) либо галогенная лампа мощностью 500 Ватт TDM ЛГ-500 Вт R7s-118мм. Рефлектор изготовлен из листа нержавеющей стали толщиной 0,5 мм с зеркальным покрытием. Для изгиба стального листа в форме эллипса было изготовлено по 3 держателя из листового алюминия толщиной 6 мм на фрезерном станке с числовым программным управлением. Расстояние между фокусами эллиптического зеркала составило 208 мм.



Рисунок 20 – Решётка из 420-и излучателей подключенная к системе генерирования сигналов



Рисунок 21 – Фотография экспериментальной установки с фазированной решёткой излучателей

Была проведена тестовая 3D печать объекта в виде куба со стороной 20 мм. Процесс печати завершился через 8 минут. В ходе печати частицы осаждались в область квадрата ~20 на 20 мм, но некоторые частицы хаотично вылетали из требуемой области. При нагревании инфракрасным излучением происходило оплавление формируемого объекта (рисунок 22). В результате печати после отделения от фоновых частиц получен куб со сглаженными краями (рисунок 23). Объект не рассыпается, но имеет низкую плотность, около 74 кг/м<sup>3</sup>, тогда как АБС пластик имеет плотность около 1020 кг/м<sup>3</sup>.



Рисунок 22 – Спекание тестового слоя под действием излучения галогенных ламп



Рисунок 23 – Сформированный объект из частиц АБС пластика

Рассмотрим систему из двух сфокусированных антенных решеток, расположенных под углом в 45 градусов к поверхности стола, с которого будет производиться их подъем (рисунок 24). Оба излучателя излучают монохрамотический сигнал на частоте 40 кГц. Волна с каждого излучателя отражается от поверхности стола в сторону другого излучателя, вследствие чего образуется картина узлов стоячих волн. При добавлении задержки излучения в один из источников, узлы стоячих волн смещаются. Таким образом, возможно, создать картину постоянного смещения стоячих волн к одному из источников ультразвукового сигнала. На рисунке 25 показан процесс захвата частиц пенопласта и удаления их с поверхности стола.





Рисунок 25 – Поднятие частиц

## пенополистирола с поверхности

# В заключении сформулированы выводы и основные результаты диссертационной работы.

Результаты аналитических расчетов и численного моделирования левитирующих выстраивания показали возможность частиц в прямоугольную плоскую сетку с шагом половину длины волны в ультразвуковом поле встречных цилиндрически сфокусированных плоских решеток. Созданная экспериментальная установка позволяет перемещать упорядоченную группу частиц в трехмерном пространстве, сохраняя их Экспериментально показана относительное положение. возможность левитации прямолинейных отрезков размерами много больше длины волны, а также объектов, составленных из прямолинейных отрезков.

Предложен метод управления широкополосным ультразвуковым полем для формирования таких траекторий движения узлов стоячих волн, чтобы обеспечить дрейф левитирующих частиц в заданное множество точек фокуса. Проведено численное моделирование полей широкополосных решёток излучателей для двух точек фокусировки.

Предложен метод левитации частиц в воздухе под действием широкополосных ультразвуковых волн, излучаемых встречно сфокусированными решетками. Экспериментально показана возможность локализации частиц в заданной области с использованием двух и четырех решеток. Использование четырех встречно направленных решеток, расположенных вдоль граней куба, позволяло управлять левитирующими частицами в трехмерном пространстве. Движение частиц в плоскости левитации осуществлялось за счет манипулирования временной задержкой излучения сигнала встречных решеток.

Предложен метод акустического захвата и левитации частиц в широкополосном вихревом поле. Экспериментально показано, что в широкополосном поле обеспечивается единственный стабильный узел стоячих волн для захвата частиц. Формирование вихревого поля осуществлено с помощью решётки излучателей, размещенных на сфере со смещением по радиусу для задания фазового сдвига.

Проведённые исследования показали возможность управления частицами для их нанесения на подложку для формирования трёхмерного объекта. Разработан способ удаления частиц с поверхности посредством воздействия ультразвукового поля на частицы. Метод основан на взаимодействии двух решеток ультразвуковых излучателей, создающих картину стоячих волн, в которой узлы дрейфуют в сторону одного из излучателей.

Предложенные технологии применения акустической левитации является совершенно новыми, и отличаются от существующих. Технология трёхмерной печати имеет высокий потенциал по увеличению скорости изготовления трёхмерных объектов. Существенное увеличение скорости позволит пропорционально увеличить размеры печатаемых объектов, что может применяться в технологиях строительства. Метод удаления частиц может послужить основой для создания ультразвукового пылесоса, который посредством перефокусировки поля может удалять частицы на расстоянии с большой площади или из труднодоступных мест.

Автор диссертации выражает свою искреннюю благодарность и безграничное уважение научному руководителю Суханову Дмитрию Яковлевичу за многолетнее плодотворное сотрудничество и поддержку научных идей автора, а также за помощь в подготовке диссертационной работы. Особую благодарность автор выражает Кокину Дмитрию Сергеевичу, Емельянову Федору Сергеевичу за большой вклад в практическую и программную реализацию экспериментальных установок, а также всему коллективу кафедры радиофизики радиофизического факультета НИ ТГУ

#### СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Суханов Д. Я. Левитация и управление упорядоченной группой частиц и прямолинейных структур в ультразвуковом поле / Д. Я. Суханов, С. Н. Росляков, Ф. С. Емельянов // Акустический журнал. – 2020. – Т. 66, № 2. – С. 154–162. – DOI: 10.31857/S0320791920020112. – 1,04 / 0,34 а.л. в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Sukhanov D. Ya. Levitation and Control for an Ordered Group of Particles and Rectilinear Structures in an Ultrasonic Field / D. Ya. Sukhanov,

and Rectilinear Structures in an Ultrasonic Field / D. Ya. Sukhanov, S. N. Roslyakov, F. S. Emel'yanov // Acoustical Physics. -2020. - Vol. 66, No 2. - P. 137–144. - DOI: 10.1134/S1063771020020104.

2. Sukhanov D. Particle levitation and control in midair using wideband ultrasonic waves / D. Sukhanov, **S. Rosliakov** // Applied Acoustics. – 2021. – Vol. 178. – Article number 108004. – 6 р. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X21000979?pes=vor (access date: 07.09.2022). – DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108004. – 0,69 / 0,34 а.л. (*Scopus*).

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019614618. Численное моделирование акустических процессов в ультразвуковом волноводе / Суханов Д. Я., Росляков С., Кузовова А. Е.; правообладатель: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (RU). Заявка № 2019613333; дата поступления – 29.03.2019; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 09.04.2019.

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus:

4. Sukhanov D. Preliminary experimental studies on particles levitation in air under the effect of wideband ultrasound waves / D. Sukhanov, **S. Rosliakov** // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1761, No 1 : Anglo-French Physical Acoustics Conference (AFPAC) 2020. Surrey, the United Kingdom, January 15–17, 2020. – Article number 012009. – 7 p. – URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1761/1/012009/pdf (access date: 07.09.2022). – DOI: 10.1088/1742-6596/1761/1/012009. – 0,8 / 0,4 а.л.

5. Sukhanov D. Y. Grouping of particles in a wideband ultrasonic field / D. Y. Sukhanov, **S. N. Rosliakov** // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2140, № 1 : 9th International Conference on Actual Problems of Radiophysics 2021, APR 2021. Tomsk, Russia, October 20–22, 2021. – Article

number 012014. – 7 р. – URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1761/1/012009/pdf (access date: 07.09.2022). – DOI: 10.1088/1742-6596/2140/1/012014. – 0,58 / 0,29 а.л.

6. Sukhanov D. Numerical modelling of levitating particles in air / D. Sukhanov, **S. Roslyakov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 516, № 1 : 3rd International Conference on Cognitive Robotics. Tomsk, Russia, November 22–24, 2018. – Article number 012005. – 4 p. – URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/516/1/012005/pdf (access date: 07.09.2022). – DOI: 10.1088/1757-899X/516/1/012005. –0,46 / 0,23 а.л.

7. **Roslyakov S.** Phased arrays of ultrasound emitters controlled by binary signals for acoustic levitation / S. Roslyakov, F. Emelyanov, N. Erzakova, E. Sivkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 516, № 1 : 3rd International Conference on Cognitive Robotics. Tomsk, Russia, November 22–24, 2018. – Article number 012033. – 4 p. – URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/516/1/012033/pdf (access date: 07.09.2022). – DOI: 10.1088/1757-899X/516/1/012033. – 0,46 / 0,12 а.л.

Публикации в прочих научных изданиях:

8. Суханов Д. Я. Захват частиц широкополосным вихревым ультразвуковым полем / Д. Я. Суханов, С. Н. Росляков // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2022. – Т. 65, № 8 (777). – С. 19–23. – DOI: 10.17223/00213411/65/8/19. – 0,58 / 0,29 а.л.

9. Росляков С. Н. Аппаратный комплекс для акустической левитации в ультразвуковом поле / С. Н. Росляков, Д. Я. Суханов // Научная сессия ТУСУР–2022: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 18–20 мая 2022 г. – Томск, 2022. – Ч. 1. – С. 78–81. – 0,46 / 0,23 а.л.

10. Росляков С. Н. Группировка частиц в широкополосном ультразвуковом поле / С. Н. Росляков, Д. Я. Суханов // Актуальные проблемы радиофизики АПР–2021 : сборник трудов IX Международной научно-практической конференции. Томск, 20–22 октября 2021 г. – Томск, 2021. – С. 81. – 0,12 / 0,06 а.л.

11. Росляков С. Численное моделирование левитации частиц в ультразвуковом поле / С. Росляков, Д. Я. Суханов // Наука. Технологии. Инновации : сборник научных трудов Всероссийской научной конференции молодых ученых. Новосибирск, 03–07 декабря 2018 г. – Новосибирск, 2018. – С. 157–160. – 0,34 / 0,17 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции. Отпечатано на участке цифровой печати Производственно-рекламной компании «Милон» Заказ № 1716 от «23» ноября 2022 г. Тираж 100 экз. г. Томск, пр. Фрунзе, 7 офис 1, тел. (3822) 21-55-75 mylon.ru