

Министерство образования и науки Российской
Федерации
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Физтех-школа аэрокосмических технологий
Кафедра вычислительной физики

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Расчетно-экспериментальное исследование
применения аберраторов для акустической
левитации

Автор:

Студент группы Б03-101
Куланов Александр Владимирович

Научный руководитель:

к.ф.-м.н.
Беклемышева Катерина Алексеевна



Москва 2025

Аннотация

Расчётно-экспериментальное исследование
применения аберраторов для акустической
левитации

Куланов Александр Владимирович

Основной целью данной работы является исследование акустической левитации в воде с помощью математического моделирования и физического эксперимента. Практический интерес представляет изучение применимости выбранного численного метода, а так же аберраторов как способа влияния на получаемое акустическое поле. Для численного эксперимента используется решатель на основе сеточно-характеристического метода.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание

1	Введение	4
2	Постановка задачи	5
3	Обзор существующих решений	6
4	Исследование и построение решения задачи	7
5	Описание практической части	8
6	Заключение	9

1 Введение

Акустическая левитация представляет собой бесконтактный метод удержания и манипуляции телами в жидкой или газообразной среде за счёт действия сил акустического давления, возникающих при взаимодействии акустических волн с объектом. За последние десятилетия эта технология приобрела широкое признание в различных областях науки и техники благодаря своей способности минимизировать механические и химические взаимодействия с удерживаемым образцом. Она находит применение в многих инженерных приложениях, например, в фармацевтической области [10], машиностроении [11] и прецизионной робототехнике [12].

В частности, акустическая левитация активно используется для бесконтактной кристаллизации, управления реакциями в микрокаплях, транспортировки чувствительных материалов и изучения фазовых переходов в условиях изоляции от твёрдых поверхностей. Однако эффективность и устойчивость таких систем в значительной степени зависят от конфигурации акустического поля, его симметрии, фокусировки и формы пространственного распределения энергии.

Одним из перспективных направлений оптимизации акустических левитаторов является использование акустических аберраторов — специально сконструированных элементов, способных искажать фазу или амплитуду ультразвуковых волн для формирования заданного пространственного распределения акустического давления. Такие аберраторы позволяют целенаправленно модифицировать звуковое поле, создавать локальные экстремумы потенциала и управлять положением левитируемых объектов с повышенной точностью.

Настоящая работа посвящена численному моделированию акустической левитации с учётом применения аберрирующих элементов. Исследуется влияние параметров аберраторов на структуру акустического поля, распределение радиационных сил и устойчивость положения левитируемых объектов. Результаты могут быть использованы при проектировании адаптивных акустических ловушек и систем бесконтактной микро- и макроманипуляции.

2 Постановка задачи

Необходимо формально изложить суть задачи в данной секции, предоставив такие ясные и точные описания, которые позволят в последующем оценить, насколько разработанное решение соответствует поставленной задаче. Текст главы должен следовать структуре технического задания, включая как описание самой задачи, так и набор требований к ее решению.

3 Обзор существующих решений

Здесь надо рассмотреть все существующие решения поставленной задачи, но не просто пересказать, в чем там дело, а оценить степень их соответствия тем ограничениям, которые были сформулированы в постановке задачи.

4 Исследование и построение решения задачи

Требуется разбить большую задачу, описанную в постановке, на более мелкие подзадачи. Процесс декомпозиции следует продолжать до тех пор, пока подзадачи не станут достаточно простыми для решения непосредственно. Это может быть достигнуто, например, путем проведения эксперимента, доказательства теоремы или поиска готового решения.

5 Описание практической части

Если в рамках работы писался какой-то код, здесь должно быть его описание: выбранный язык и библиотеки и мотивы выбора, архитектура, схема функционирования, теоретическая сложность алгоритма, характеристики функционирования (скорость/память).

6 Заключение

Здесь надо перечислить все результаты, полученные в ходе работы. Из текста должно быть понятно, в какой мере решена поставленная задача.

Список литературы

- [1] *Магомедов, К. М.* Сеточно-характеристические численные методы / К. М. Магомедов, А. С. Холодов. — М.: Наука, 1988.
- [2] *Казаков, А. О.* Численное моделирование волновых процессов в задачах ультразвукового неразрушающего контроля сеточнохарактеристическим методом / А. О. Казаков. — Дисс. канд. физ.-мат. наук, М., МФТИ, 2019.
- [3] *Челноков, Ф. Б.* Явное представление сеточно-характеристических схем для уравнений упругости в двумерном и трехмерном пространствах / Ф. Б. Челноков // *Матем. моделирование*. — 2006. — Vol. 18, no. 6.
- [4] *Петров, И. Б.* Лекции по вычислительной математике / И. Б. Петров, А. И. Лобанов. — Интернет-университет информационных технологий, 2006.
- [5] *Ландау, Л.* Теория упругости / Л. Ландау, Е. Лифшиц. — Наука, 1965.
- [6] *Исакович, М. А.* Общая акустика / М. А. Исакович. — Наука, 1973.
- [7] *Горьков, Л. П.* О силах, действующих на малую частицу в акустическом поле в идальной жидкости / Л. П. Горьков // *Доклады Академии наук СССР*. — 1961. — Vol. 140, no. 1.
- [8] *Polychronopoulos, Spyros.* Acoustic levitation with optimized reflective metamaterials / Spyros Polychronopoulos, Gianluca Memoli // *Nature*. — 2020.
- [9] *Zhang, Fuqiang.* The Experiment of Acoustic Levitation and the Analysis by Simulation / Fuqiang Zhang, Zelai Jin // *Open Access Library Journal*. — 2018.
- [10] *Ruiken, Jan-Paul.* Drop Dissolution Intensified by Acoustic Levitation / Jan-Paul Ruiken, Jörn Villwock, Matthias Kraume // *Micromachines*. — 2024.

-
- [11] Near-field acoustic levitation and applications to bearings: a critical review / Minghui Shi, Kai Feng, Junhui Hu et al. // *International Journal of Extreme Manufacturing*. — 2019.
- [12] *Nakahara, Jared*. Contact-less Manipulation of Millimeter-scale Objects via Ultrasonic Levitation / Jared Nakahara, Boling Yang, Joshua R. Smith // 2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). — 2020.
- [13] *Noviello, C*. Mastering STM32 / C. Noviello. — LeanPub, 2022.