

## **Аннотация**

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 также аберраторов как способа влияния на получаемое акустическое поле. Для численного эксперимента используется решатель на основе сеточно-характеристического метода. В результате проведены численные исследования различных форм аберратора для разных частот излучателя, получены картины потенциала Горькова. Разработана экспериментальная установка для акустической левитации в воде.

# Содержание

<b>1 Введение</b>	<b>3</b>
1.1 Актуальность . . . . .	3
1.2 Цель работы . . . . .	6
<b>2 Математическая модель</b>	<b>8</b>
2.1 Система уравнений акустики . . . . .	8
2.2 Выражения для коэффициентов прохождения и отражения волны . . . . .	9
2.3 Потенциал Горькова . . . . .	10
<b>3 Описание численного метода</b>	<b>11</b>
3.1 Сеточно-характеристический метод . . . . .	11
3.2 Программный комплекс . . . . .	12
<b>4 Постановка задачи и эксперимента</b>	<b>14</b>
4.1 Постановка задачи . . . . .	14
4.2 Пьезоэлектрический эффект . . . . .	14
4.3 Создание экспериментальной установки . . . . .	15
4.4 Постановка численного эксперимента . . . . .	21
<b>5 Результаты</b>	<b>23</b>
5.1 Результаты численных расчетов . . . . .	23
5.2 Результаты физического эксперимента . . . . .	31
<b>6 Заключение</b>	<b>33</b>

# 1 Введение

## 1.1 Актуальность

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 [1], машиностроении [2], прецизионной робототехнике [3], [4], анализе материалов [5], а также биологии [6]. Примером численного моделирования акустической левитации в простейшем случае является работа [7].

В частности, одним из приложений является необходимость бесконтактного позиционирования биологических тканей в задаче биопечати. Например, задача биопечати коленного хряща актуальна в связи с ограниченной способностью хрящевой ткани к регенерации и высокой распространенностью суставных повреждений. Современные методы лечения, пример которого представлен на рис. 2 [8], имеют ряд недостатков, таких как отторжение, износ, плохую интеграцию. Рентген-снимки коленного сустава после протезирования представлены на рис. 3 и 4. Иллюстрации взяты из работ [9] и [10] соответственно. Технологии 3D-биопечати позволяют создавать более совершенные персонализированные хрящевые конструкции, что делает их перспективными для замещения и восстановления хряща коленного сустава. Форма хряща обуславливает форму моделируемого в настоящей работе аберратора.

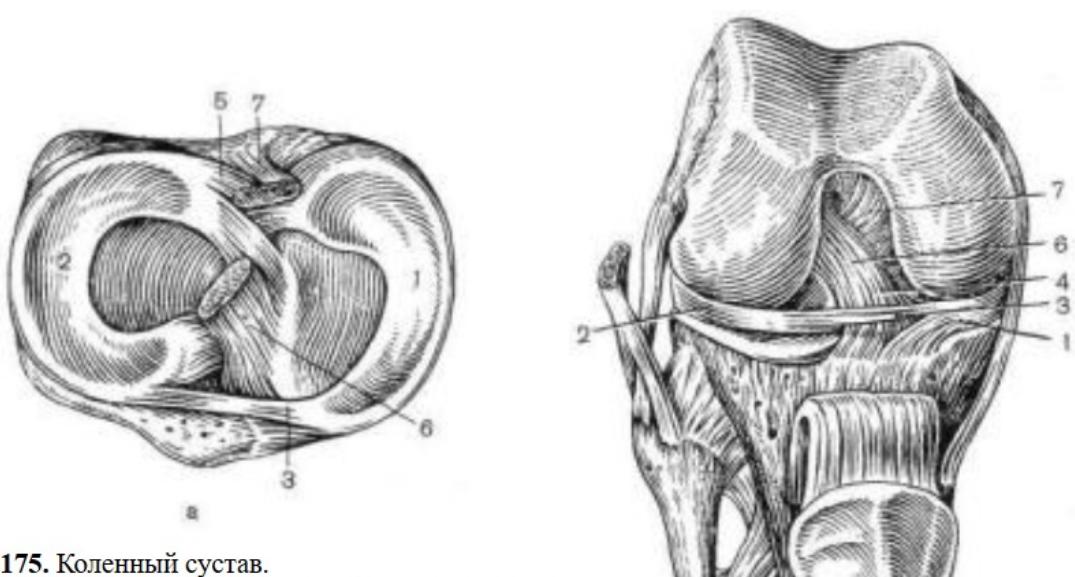


Рис. 175. Коленный сустав.

а — расположение менисков и места прикрепления связок на суставной поверхности большеберцовой кости; б — сустав вскрыт спереди в положении сгибания; в — сустав вскрыт с медиальной стороны, бедренная кость распилена в сагиттальной плоскости на уровне межмыщелковой ямки; г — сагиттальный распил сустава.

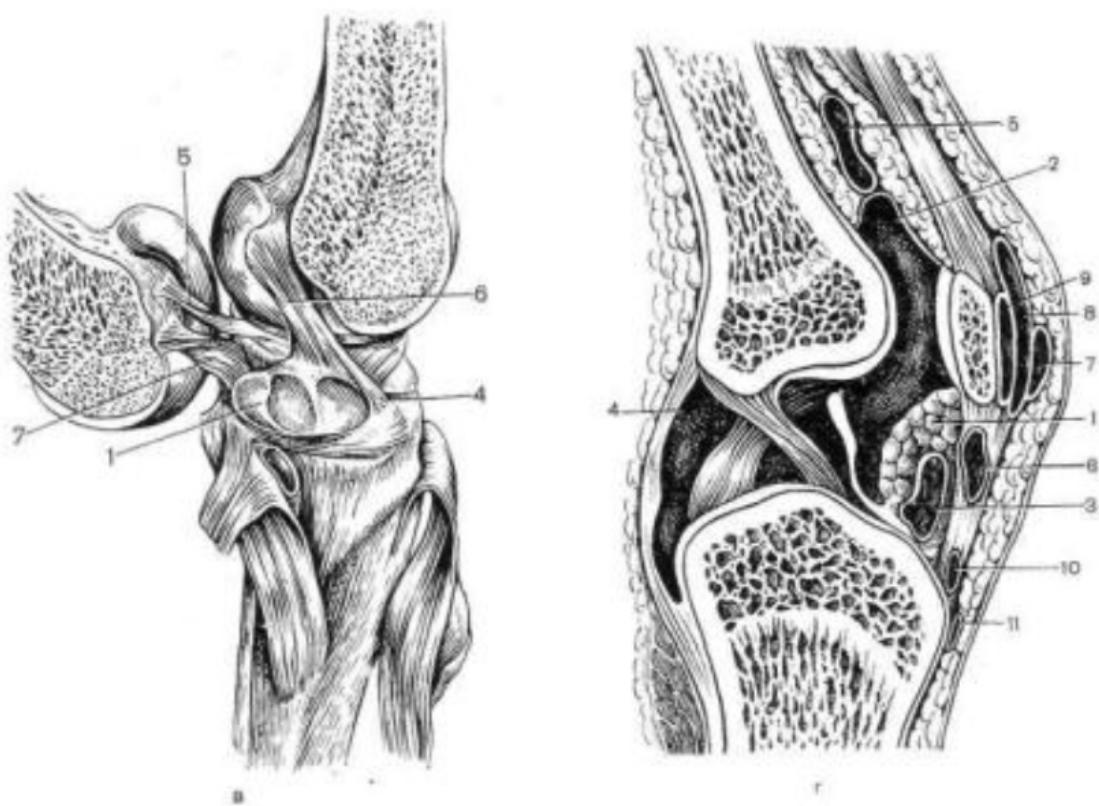


Рис. 1: Коленный сустав, иллюстрация взята из книги [11]



Рис. 2: Пример протеза для коленного сустава

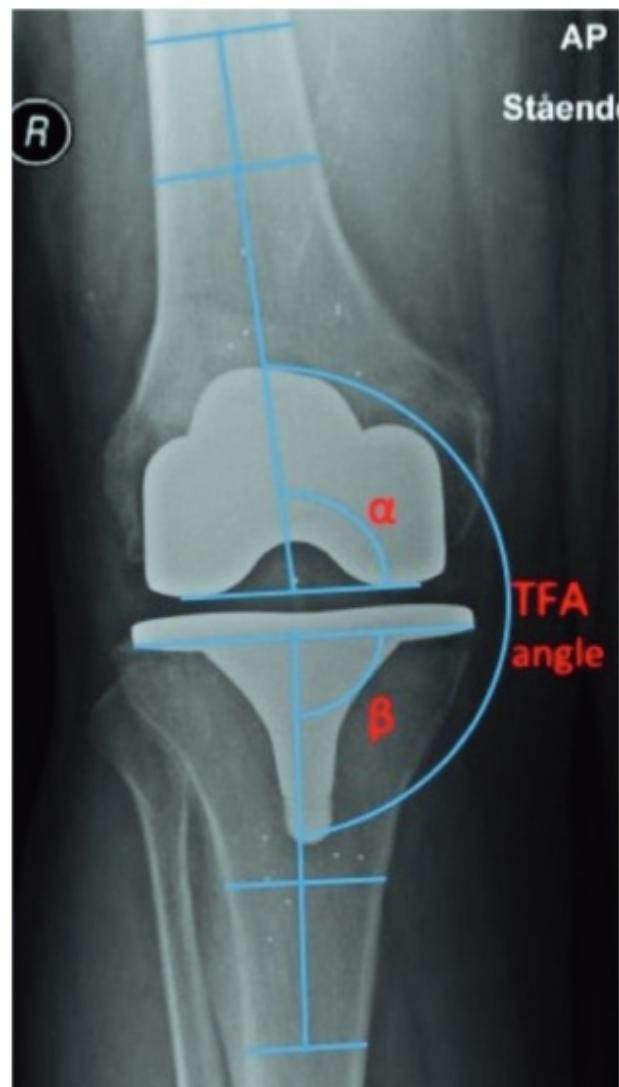


Рис. 3: Рентген-снимок протеза для коленного сустава



Рис. 4: Рентген-снимок протеза для коленного сустава

Существуют различные технические способы управления акустическим полем. К примеру, использование отражателей сложной формы в совокупности с массивом излучателей исследовано в [12]. Другим подходом оптимизации акустических левитаторов является использование акустических аберраторов — специальных элементов, способных искажать фазу или амплитуду акустических волн для формирования заданного пространственного распределения давления. Такие аберраторы позволяют целенаправленно управлять звуковым полем, создавать нужную форму потенциала и задавать положение левитируемых объектов, не прибегая к использованию сложных массивов излучателей.

## 1.2 Цель работы

Настоящая работа посвящена численному моделированию акустической левитации с учётом применения аберрирующих элементов. Исследуется влияние параметров аберраторов на структуру акустического поля, получен-

ная картина потенциала Горькова и реальная устойчивость положения левитируемых объектов. Результаты могут быть использованы при проектировании перспективных систем для микро- и макроманипуляции. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработка и создание экспериментальной установки, позволяющей проводить физические эксперименты по акустической левитации в жидкости с возможностью использования различных излучателей
2. Разработка или выбор готового программного комплекса, с помощью которого проводится моделирование физического эксперимента

## 2 Математическая модель

### 2.1 Система уравнений акустики

Основой для описания исследуемой среды является модель линейной упругости. Тогда в общем случае, согласно [13]

$$\begin{aligned}\rho \dot{\vec{v}} &= \nabla \cdot \mathbb{T} + \vec{f} \\ \dot{\mathbb{T}} &= \mathbf{q} : \dot{\varepsilon} + \mathbf{F}\end{aligned}\tag{1}$$

Здесь  $\rho$  - плотность в данной точке,  $\vec{v}$  - скорость частиц в данной точке,  $\mathbb{T}$  - тензор напряжений в данной точке,  $\varepsilon$  - тензор деформаций в данной точке,  $\vec{f}$  и  $\mathbf{F}$  - силы,  $\mathbf{q}$  - тензор упругих коэффициентов. Далее везде силы примем равными нулю, согласно постановке задачи. Пользуясь малостью смещения, используем выражения для тензора малых деформаций

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (\nabla \otimes \vec{r} + \vec{r} \otimes \nabla)\tag{2}$$

Здесь  $\vec{r}$  - вектор смещения в данной точке,  $\otimes$  - оператор тензорного умножения. Дифференцируя это выражения по времени и подставляя в исходную систему, получаем

$$\begin{aligned}\rho \dot{\vec{v}} &= \nabla \cdot \mathbb{T} \\ \dot{\mathbb{T}} &= \frac{1}{2} \mathbf{q} : (\nabla \otimes \vec{v} + \vec{v} \otimes \nabla)\end{aligned}\tag{3}$$

Воспользуемся теперь тем, что исследуемая среда изотропна, то есть свойства одинаковы для любого направления в пространстве. Известно, что для такого материала количество независимых коэффициентов в тензоре  $\mathbf{q}$  равно двум. Их называют параметры Ламе и обычно обозначают  $\lambda, \mu$ . Полезно также представить их выражения через модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\ \mu &= \frac{E}{2(1+\nu)}.\end{aligned}\tag{4}$$

Итого, для изотропного случая можно записать

$$\begin{aligned}\rho \dot{\vec{v}} &= \nabla \cdot \mathbb{T} \\ \dot{\mathbb{T}} &= \lambda(\nabla \cdot \vec{v})\mathbb{I} + \mu(\nabla \otimes \vec{v} + \vec{v} \otimes \nabla)\end{aligned}\tag{5}$$

Остается последний шаг преобразования. Применим акустическое приближение: тензор напряжений зависит только от одного скалярного параметра  $p$ , который называют давлением, и выражается через единичный тензор  $\mathbb{I}$ . Модуль сдвига  $\mu$  считается равен нулю.

$$\mathbb{T} = -p\mathbb{I}\tag{6}$$

Эта модель хорошо подходит для описания жидкостей, что и требуется в настоящей работе. Традиционно переобозначим  $\lambda$  за  $K$  — модуль всестороннего сжатия. Наконец, подставляя это выражение в 5, получаем

$$\begin{aligned}\rho \dot{\vec{v}} &= -\nabla(p\mathbb{I}) \\ \dot{p} &= -K(\nabla \cdot \vec{v})\end{aligned}\tag{7}$$

## 2.2 Выражения для коэффициентов прохождения и отражения волны

Для некоторых дальнейших рассуждений полезно понимать, какая часть волны проходит через контактную границу, а какая отражается обратно. В [14] приведено более подробное рассуждение, в настоящей же работе ограничимся соотношениями для нормально падающей на контактную границу волны:

$$\begin{aligned}R &= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \\ T &= \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}\end{aligned}\tag{8}$$

Здесь  $R$  - коэффициент отражения по амплитуде,  $T$  - коэффициент прохождения по амплитуде. Возведя их в квадрат можно получить коэффициенты по энергии, но они не понадобятся. Индексам "1" и "2" соответствуют величины в среде из которой и в которую бежит волна соответственно. Также

важное обозначение

$$Z = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \rho c \quad (9)$$

— акустический импеданс среды, величина, характеризующая сопротивление среды распространению звуковых волн,  $c$  — скорость звука в среде.

## 2.3 Потенциал Горькова

Потенциал Горькова — это скалярная функция, отрицательный градиент которой описывает силу, действующую на малую частицу сферической формы в акустическом поле. Оригинальную формулу можно найти в [15], а в настоящей работе будем использовать безразмерный потенциал, удобный для реализации в программном коде:

$$U = \frac{\sqrt{\langle p'^2 \rangle}}{3} - \frac{\sqrt{\langle v'^2 \rangle}}{2} \quad (10)$$

$$\langle p'^2 \rangle = \langle p^2 \rangle - \langle p \rangle^2, \quad \langle v'^2 \rangle = \langle \mathbf{v}^2 \rangle - \langle \mathbf{v} \rangle^2 \quad (11)$$

Здесь давление и скорость приведены к безразмерной форме делением на  $\rho c$  и  $c$  соответственно.

### 3 Описание численного метода

#### 3.1 Сеточно-характеристический метод

В настоящей работе используется сеточно-характеристический численный метод (СХМ). В самой общей постановке и подробно этот метод описан в [16], а для системы уравнений акустики подробно рассмотрен, помимо прочего, в [14]. Для настоящей работы приведем краткое описание построения и применения данного метода.

Для произвольной трехмерной области рассматривается гиперболическая система уравнений:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 \mathbf{A}_i \frac{\partial \vec{u}}{\partial x_i} = 0. \quad (12)$$

Здесь матрицы  $\mathbf{A}_i$  не зависят от пространственных координат и времени. Тот факт, что система гиперболическая, то есть её матрицы имеют полный набор собственных векторов и только вещественные собственные числа, позволяет разбивать эту систему на независимые уравнения переноса. Для этого необходимо представить исходную матрицу в виде спектрального разложения

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}^{-1} \Lambda \mathbf{U} \quad (13)$$

где  $\mathbf{U}^{-1}$ ,  $\mathbf{U}$  — матрицы собственных векторов и строк соответственно. Далее, переходя к инвариантам Римана  $\vec{r} = \mathbf{U} \vec{u}$ , получаем

$$\frac{\partial \vec{r}}{\partial t} + \Lambda \frac{\partial \vec{r}}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

Так как матрица  $\Lambda$  диагональна, система распадается на независимые скалярные уравнения переноса. Для полученных одномерных уравнений применяется главная идея сеточно-характеристического метода. Из точки на временном слое  $n + 1$  выпускается характеристика, вдоль которой сохраняется значение решения. Далее функция интерполируется в точке пересечения этой характеристики с предыдущим времененным слоем. После этого производится обратное преобразование  $\vec{u} = \mathbf{U}^{-1} \vec{r}$ . Сказанное выше проиллюстрировано на рисунке 5:

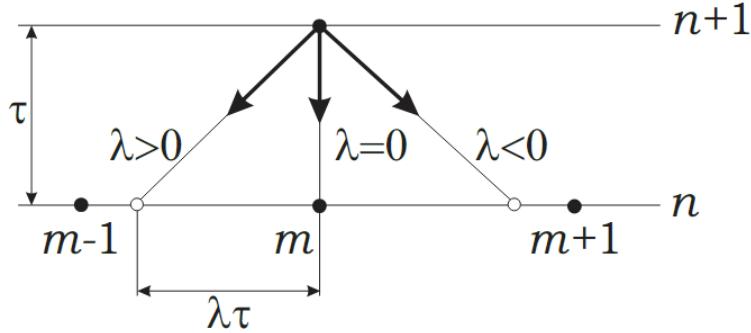


Рис. 5: Иллюстрация сеточно-характеристического метода в одномерном случае

Для системы уравнений акустики спектральное разложение выглядит довольно просто и было описано в [14]. Приведем лишь результат разложения. Вдоль направления  $\vec{e}$  оно выглядит следующим образом:

$$\mathbf{A} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \vec{e} & \vec{e} & \vec{e}' & \vec{e}'' \\ c\rho & -c\rho & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{e}^T & \frac{1}{c\rho} \\ \vec{e}^T & -\frac{1}{c\rho} \\ 2\vec{e}'^T & 0 \\ 2\vec{e}''^T & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

В данном контексте  $\vec{e}, \vec{e}', \vec{e}''$  образуют правую тройку, а собственные значения с матрицы  $\mathbf{A}$  равны

$$c = \pm \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (16)$$

$$c = 0$$

## 3.2 Программный комплекс

В настоящей работе используется программный комплекс, реализующий СХМ в 3D на языке Python. Его автором является А. В. Васюков [17]. Выбор именно такого комплекса заключается в простоте использования и удобстве доработки, однако пришлось жертвовать скоростью расчетов. Расчеты производятся на ортогональной сетке, примерное время одного расчета — десятки минут. Простота использования заключается в удобстве пони-

мания и написания программного кода на языке Python, благодаря чему без особых усилий можно варьировать граничные условия и параметры среды. Проще говоря, при таком подходе большее количество сил и времени можно потратить на создание экспериментальной установки, что в настоящей работе оказалось нетривиальной задачей. Визуализация и контроль решения производились в среде ParaView, а также средствами библиотеки matplotlib.

## 4 Постановка задачи и эксперимента

### 4.1 Постановка задачи

Как было сказано ранее, основной целью работы является изучение применения аберраторов для акустической левитации в воде. Исходя из этого были сформулированы требования к экспериментальной установке:

- Главным инструментом для контроля формы распределения акустического давления является аберратор, то есть не используются матрицы из излучателей (используется один излучатель), а также отражатели в форме, отличной от плоской.
- В качестве излучателя используется пьезоэлемент. В данном случае это решение безальтернативное.
- Диапазон доступных частот в 10–100 кГц и величина скорости звука в воде накладывают ограничения на размер резервуара для воды.

В качестве формы аберратора был выбран достаточно простой синусоидальный профиль, чтобы его можно было изготовить не прибегая к сложным технологиям.

### 4.2 Пьезоэлектрический эффект

Как было сказано ранее, в экспериментальной установке излучателем является пьезоэлемент, так что следует привести краткие сведения о том, что это такое. Пьезоэлектрический эффект представляет собой физическое явление, заключающееся в возникновении электрического заряда на поверхности некоторых кристаллических материалов при их механическом деформировании. Этот эффект наблюдается в веществах с анизотропной кристаллической структурой, не обладающей центром симметрии. Он проявляется в двух формах: прямой и обратной.

Прямой пьезоэлектрический эффект заключается в генерации электрического потенциала в ответ на приложенное механическое воздействие (сжатие, растяжение, изгиб и др.). Это происходит вследствие изменения положения ионов в кристаллической решетке, что приводит к поляризации мате-

риала и возникновению поверхностного заряда. Сила возникшего электрического поля пропорциональна величине механической деформации. Обратный пьезоэлектрический эффект представляет собой деформацию кристалла под действием внешнего электрического поля. Это связано с перераспределением внутренних сил в кристаллической решётке, вызывающим изменение её геометрических размеров.

Наиболее ярко выраженные пьезоэлектрические свойства наблюдаются у таких материалов, как кварц, турмалин, титанат бария, цирконат-титанат свинца (PZT, пьезоэлементы из него используются в настоящей работе), а также у некоторых полимеров, например поливинилиденфторида (PVDF).

Благодаря способности преобразовывать электрический сигнал в механический такой же формы, пьезоэлемент отлично подходит для генерации синусоидальных волн, которые необходимы для акустической левитации.

### 4.3 Создание экспериментальной установки

Проектирование и создание экспериментальной установки оказалось нетривиальной задачей. Готовые решения не рассматривались, так как задача довольно специфическая, поэтому они дорого стоят или их тяжело найти и купить. Было принято создавать установку из условно подручных средств. Основными частями экспериментальной установки являются:

- Резервуар с водой — среда для левитации частиц
- Пьезоэлектрический элемент в качестве генератора волн в среде
- Источник синусоидального сигнала
- Усилитель для источника сигнала
- Источник питания для усилителя
- Аберратор
- Левитирующие частицы

Расскажем по порядку про каждый из пунктов. В качестве резервуара был выбран пластмассовый контейнер размером приблизительно 20x18x15 см. Выбор обусловлен простотой приобретения и наличием прозрачных стенок для

визуального наблюдения. Также размер позволяет уместить несколько длин волн в диапазоне 10–100 кГц, так как изначально не было ясно, какая частота в итоге будет использована.

В роли пьезоэлементов были опробованы три образца кристаллов с разной резонансной частотой:

- Цилиндр 14x12 мм, 108 кГц
- Кольцо 46x16x9 мм, 38 кГц
- Кольцо 22x10x8 мм, 60 кГц

К образцам было необходимо припаять провода и изолировать от воды во избежание короткого замыкания. Пайка производилась на минимально доступной температуре паяльной станции 270°C, так как при перегреве кристаллы теряют свои пьезоэлектрические свойства. Для электрической изоляции использовалась эпоксидная смола. Здесь стоит сказать еще об одной важной особенности, а именно о согласующих слоях между излучателем и средой. Если у двух сред сильно отличается акустический импеданс  $Z$ , то большая часть волны может отражаться от границы, что сильно ухудшает картину потенциала Горькова (это наглядно можно видеть из формул 8). Некоторую информацию об этой теме можно найти, например, в [18]. Суть состоит в том, что при правильном выборе материала и его толщины можно добиться снижения отражения от контактной границы. В настоящей работе для удобства согласующий слой сделан из эпоксидной смолы толщиной  $\frac{v}{4f}$ , где  $v$  и  $f$  — скорость звука и частота в смоле. Из-за различия частоты для разных пьезоэлементов толщина получалась разная. Формы для отливки были напечатаны на 3D принтере из пластика PETG, так как автор посчитал это самым простым способом.



Рис. 6: Цилиндрический пьезоэлемент, 108 кГц

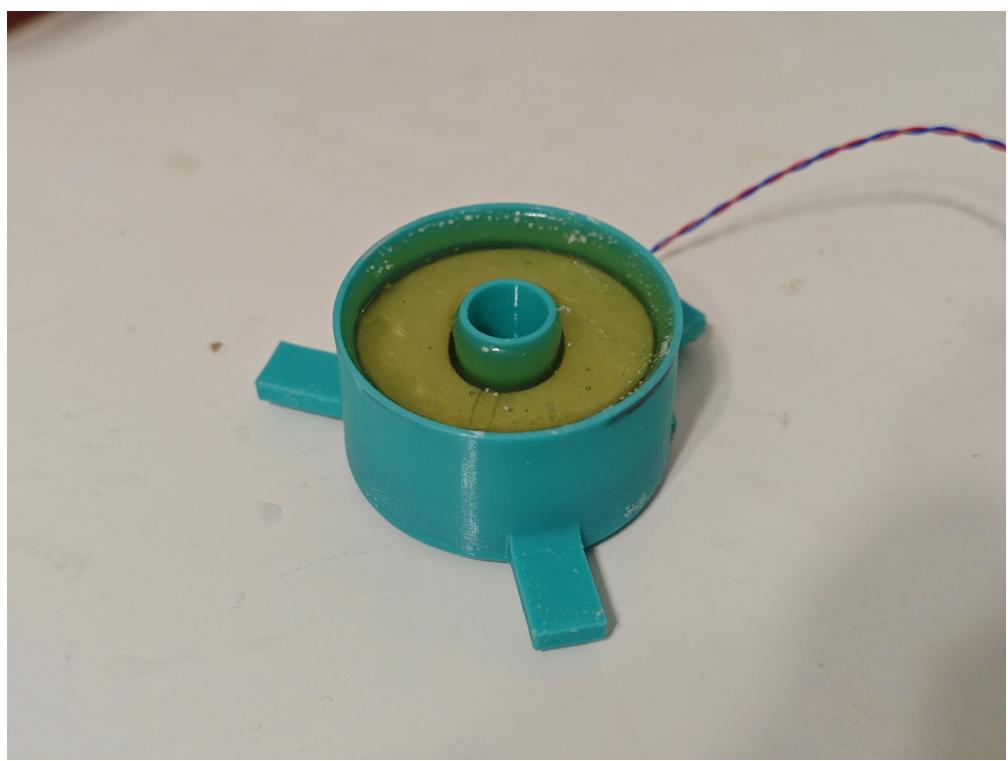


Рис. 7: Кольцевой пьезоэлемент, 38 кГц

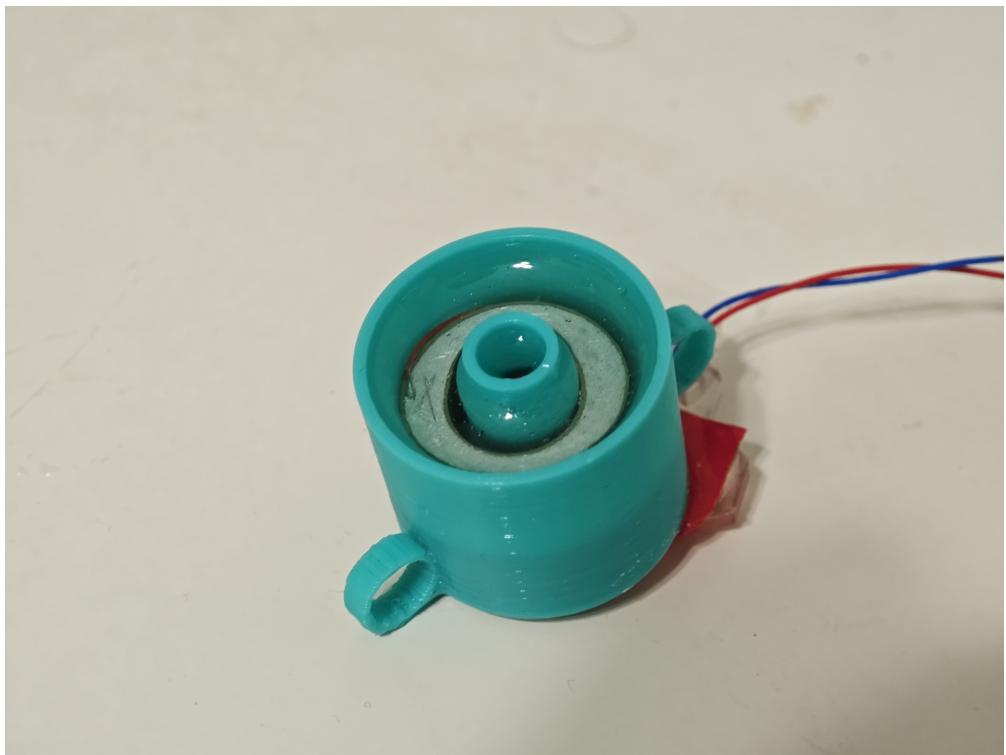


Рис. 8: Кольцевой пьезоэлемент, 60 кГц

Для генерации синусоидального сигнала было решено использовать микроконтроллер. Такой выбор обусловлен тем, что автор знаком с программированием микроконтроллеров серии STM32, а остальные способы, например аналоговое преобразование ШИМ-сигнала требуют более глубоких знаний в области радиоэлектроники. Также синтез сигнала на микроконтроллере позволяет в реальном времени настраивать частоту, что очень удобно. Минусом данного подхода является тот факт, что у любого цифрового сигнала неограниченный спектр, и, вообще говоря, нужно ставить фильтр на выход генератора. В настоящей работе это сделано не было и влияние этого фактора не изучалось. Регулировка частоты реализована в виде отправки команды с компьютера на микроконтроллер.

Ввиду отсутствия доступных готовых решений, усилитель был создан в виде платы на основе микросхемы LM1875T. Вообще говоря, эта микросхема является усилителем для звуковой аппаратуры и не подходит ультразвуковых излучателей, однако годится для кратковременного использования на интересующих частотах и является доступной. Так как автор не является специалистом в области радиотехники, в роли схемы была взята соответствующая из руководства для LM1875T [19] (рис. 9). Фото получившейся платы представлено на рис. 10.

## Typical Applications For Single Supply Operation

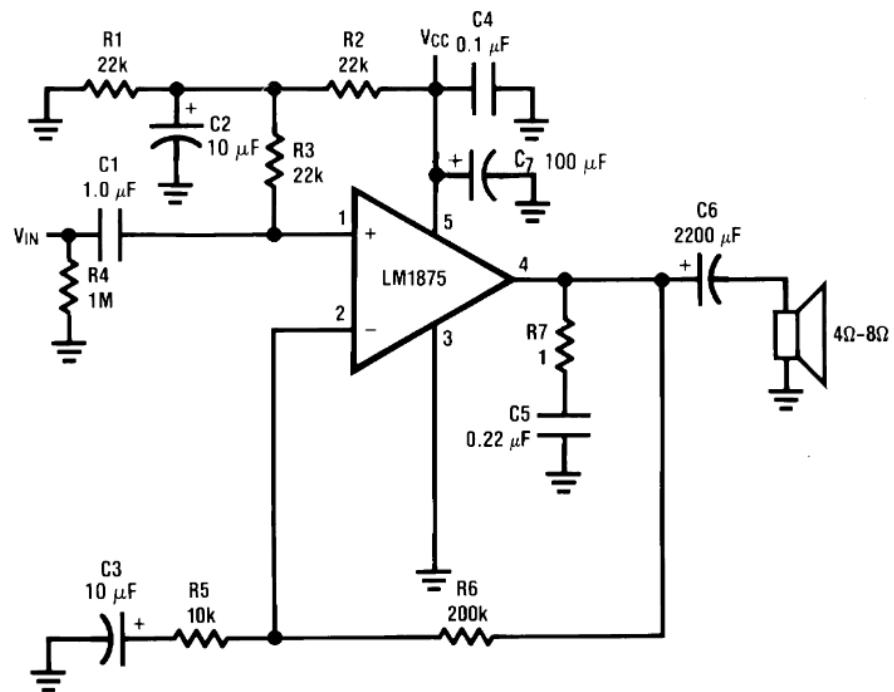


Figure 2.

Рис. 9: Электрическая схема усилителя мощности, используемого в настоящей работе

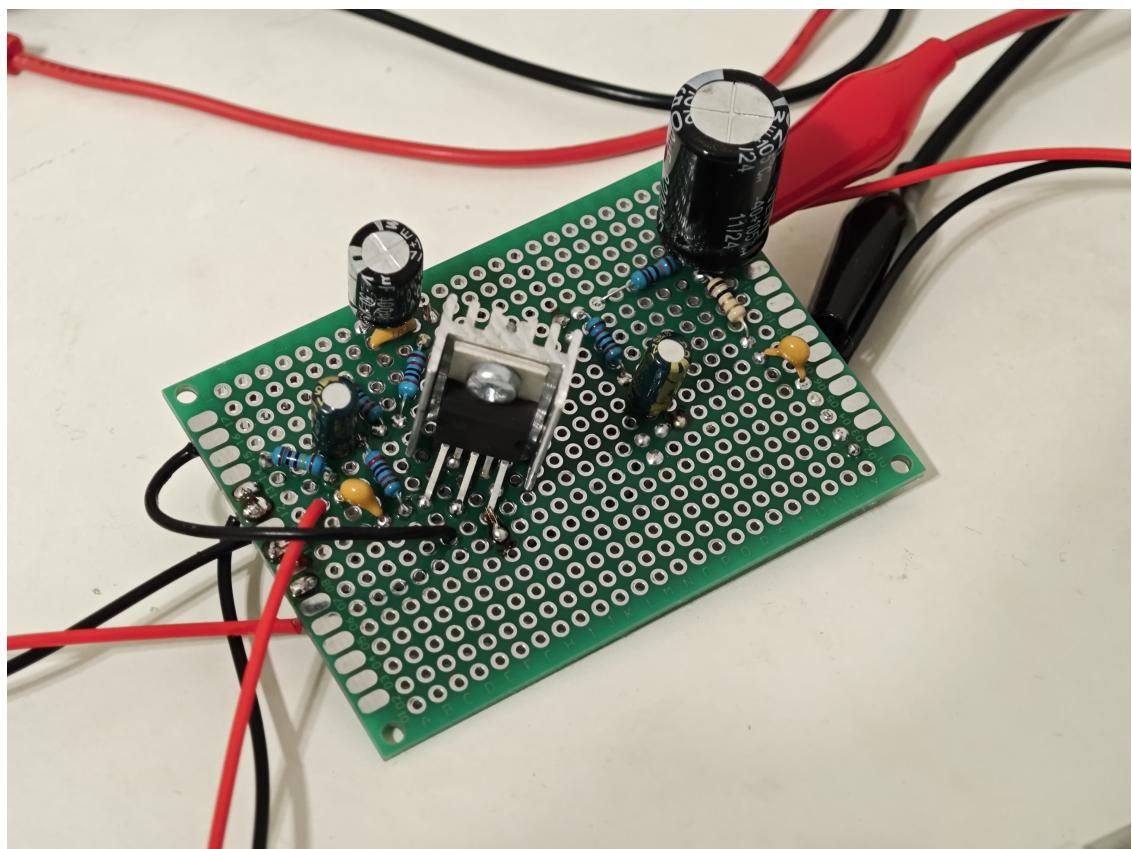


Рис. 10: Плата усилителя мощности

В качестве источника питания был взят простой лабораторный. Возможно, для минимизации помех в синусоидальном сигнале стоило взять более совершенный источник, однако этот вопрос не изучался в настоящей работе.

Аберратор — главная часть данной работы — планировалось изготавливать либо путем отливки силикона в формах, напечатанных на 3D принтере, либо печатать сразу целиком.

В роли левитирующих частиц могли выступать икринки, манная каша или шарики из пластика PLA. Важно, чтобы частицы в спокойной воде тонули не очень быстро, не растворялись и не теряли сферическую форму.

На рисунке 11 представлено фото экспериментальной установки. Слева снизу — сосуд с пьезоэлементом на дне, около него источник питания. Справа от источника — осциллограф, который подключен к выходу усилителя и позволяет контролировать сигнал, приходящий на излучатель. Посередине находится плата усилителя, к которой подключен микроконтроллер (небольшая черная плата), источник питания и пьезоэлемент. Микроконтроллер соединен через адаптер с компьютером.

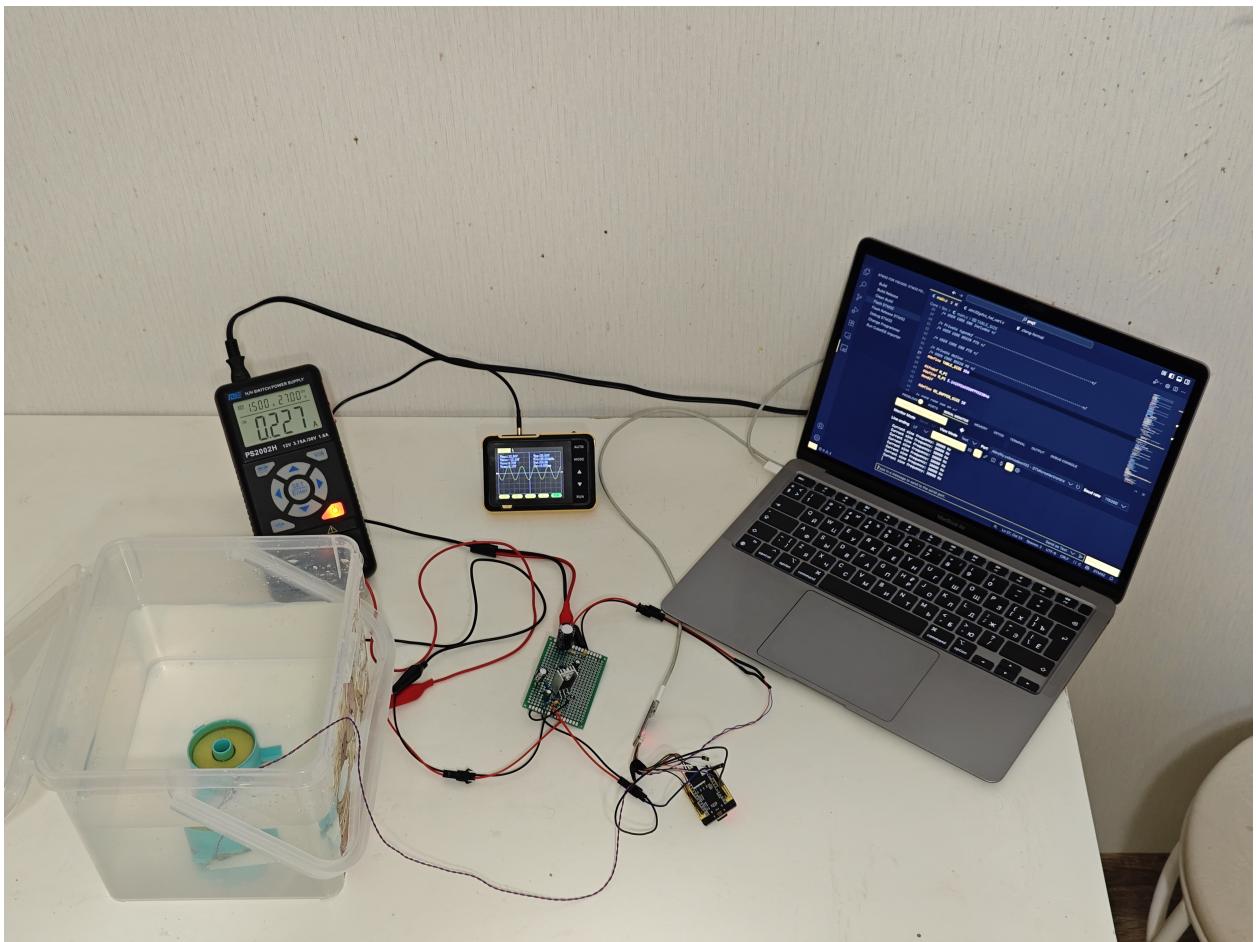


Рис. 11: Фото экспериментальной установки

#### 4.4 Постановка численного эксперимента

В численном эксперименте интерес представляло посмотреть на потенциал Горькова для различных форм аберратора, различных частот и форм излучателя, в соответствии с созданной экспериментальной установкой. Параметры реологии были одинаковые для всех расчетов, здесь "п" — пластик, материал аберратора, "в" — вода:

Таблица 1 – Акустические параметры для аберратора и воды

Материал	$c$ , м/с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Пластик	2200	1270
Вода	1500	1000

Шаг сетки был разным для разных серий численных опытов. Его выбор в каждом случае обусловлен балансом между скоростью расчета и раз-

решением геометрии. Сетка во всех случаях ортогональная. Для кольцевого пьезоэлемента с частотой 38 кГц в роли расчетной области была взята прямоугольная область реальным размером 10x10x10 см. Расчетная область соответствует центральной части сосуда. Границные условия ставятся следующие:

- На боковых стенках — поглощение. Предполагается, что в реальном эксперименте стенки далеко и отражение от них мало.
- На верхней и нижней границе — отражение. Это соответствует действительности, так как в реальности происходит отражение от пластикового дна снизу и свободной границы воды сверху.

Пьезоэлемент моделируется источником на нижней границе. Задается давление, зависящее от времени по гармоническому закону. Количество шагов по времени выбирается исходя из следующего условия: волна от источника должна дойти до верхней границы два раза. Это позволяет получить приемлемое усреднение для расчета потенциала Горькова, при этом экономится время выполнения программы. В качестве аберратора моделируются две формы параболическая и полупериод косинуса.

Для цилиндрического пьезоэлемента с частотой 108 кГц была выбрана расчетная область размером 5x5x5 см. Уменьшение области связано с тем, что для большей частоты образуется больше минимумов в потенциале Горькова. Формой для аберратора выступил синус с различным числом периодов. Остальные параметры такие же, как в постановке для кольцевого излучателя.

## 5 Результаты

### 5.1 Результаты численных расчетов

Ниже представлены результаты моделирования для постановки с кольцевым источником с частотой 38 кГц. На рисунке 12 представлен типичный вид кольцевого излучателя на расчетной сетке.

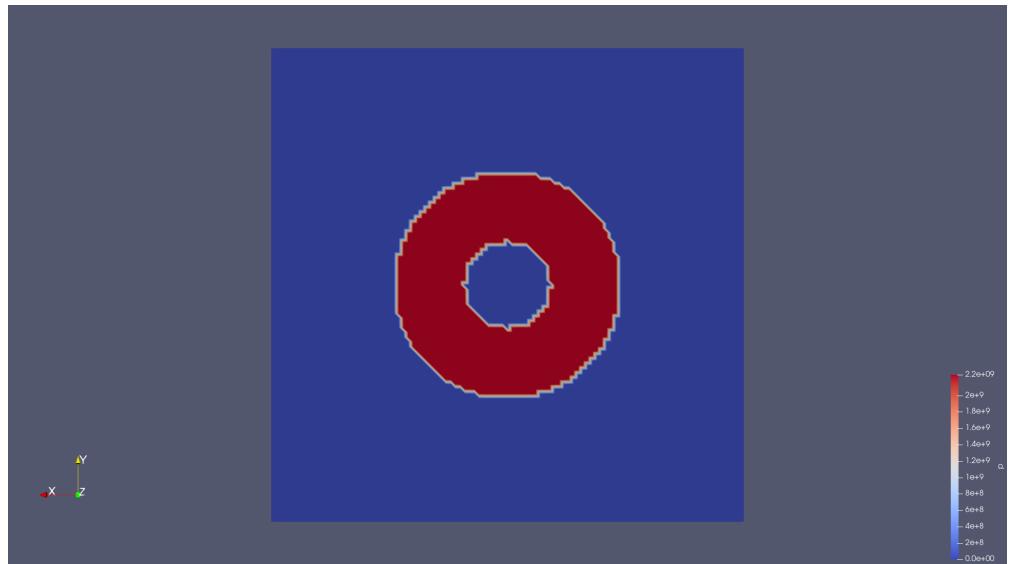


Рис. 12: Кольцевой излучатель, вид снизу на расчетную область

На рисунках 13, 14, 15, 15 отображены результаты моделирования апертура в виде полупериода синуса. Как можно видеть, при малой высоте профиля форма потенциала почти не отличается от равномерной, как на рис. 17. При увеличении высоты в некоторый момент по бокам от вершины возникают две отдельные области минимума потенциала, вместо одной протяженной.

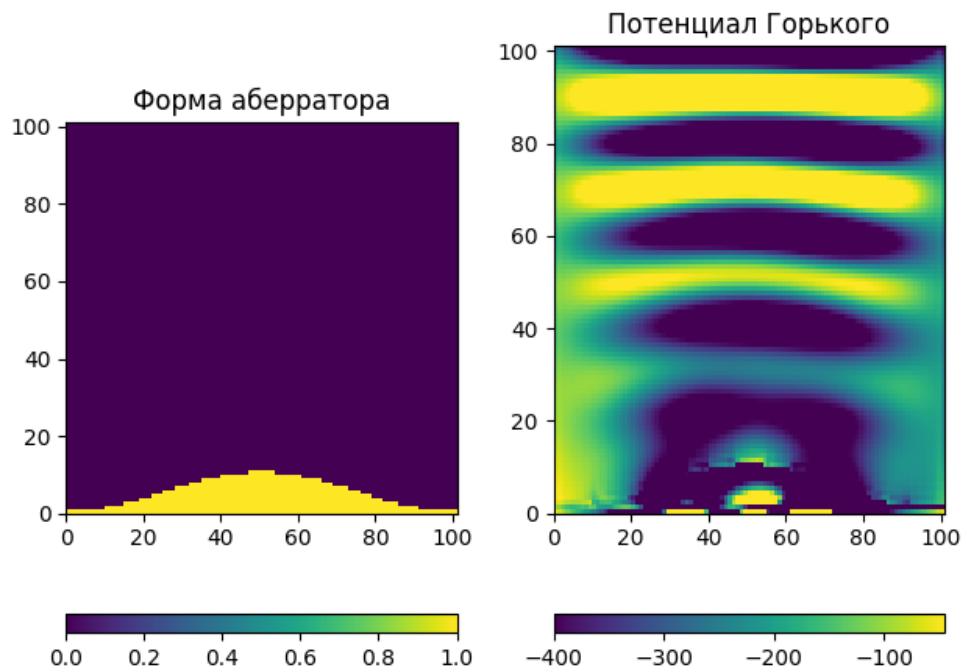


Рис. 13: Результат расчета для кольцевого пьезоэлемента 38 кГц, аберратор синусоидальной формы

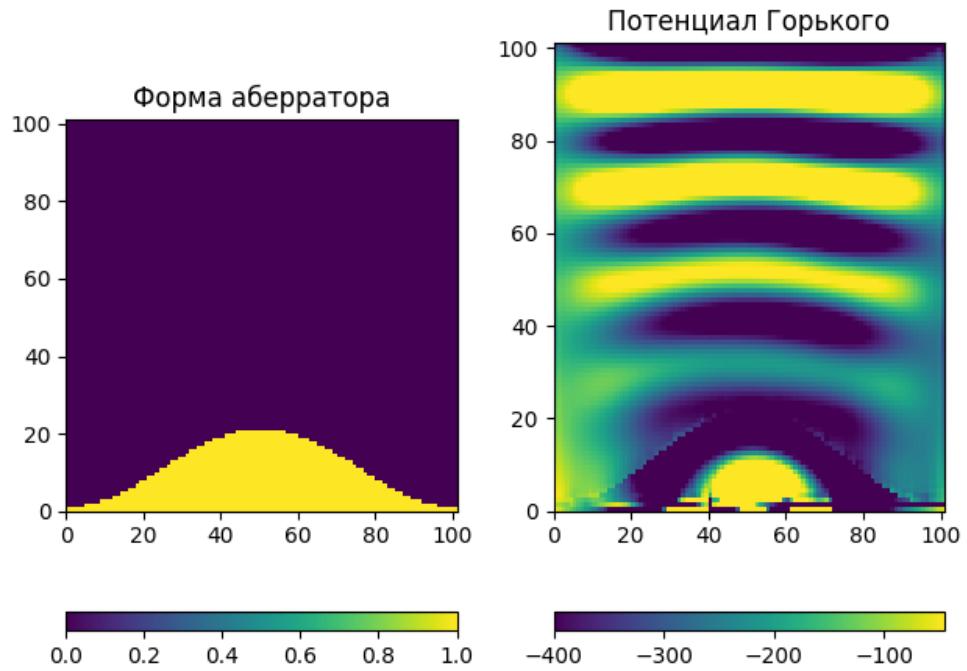


Рис. 14: Результат расчета для кольцевого пьезоэлемента 38 кГц, аберратор синусоидальной формы

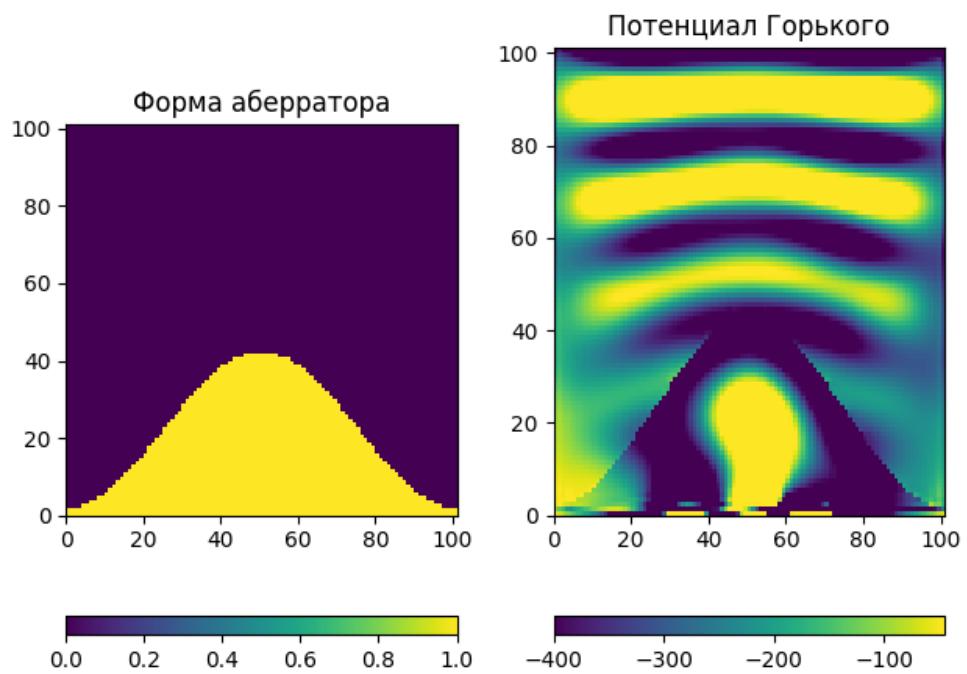


Рис. 15: Результат расчета для кольцевого пьезоэлемента 38 кГц, aberrator синусоидальной формы

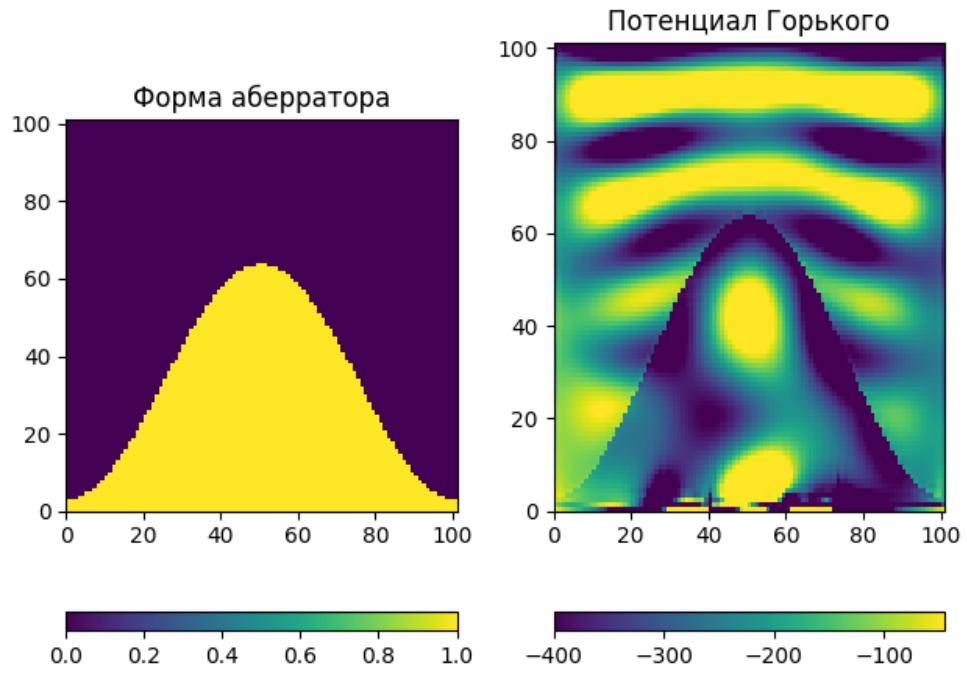


Рис. 16: Результат расчета для кольцевого пьезоэлемента 38 кГц, aberrator синусоидальной формы

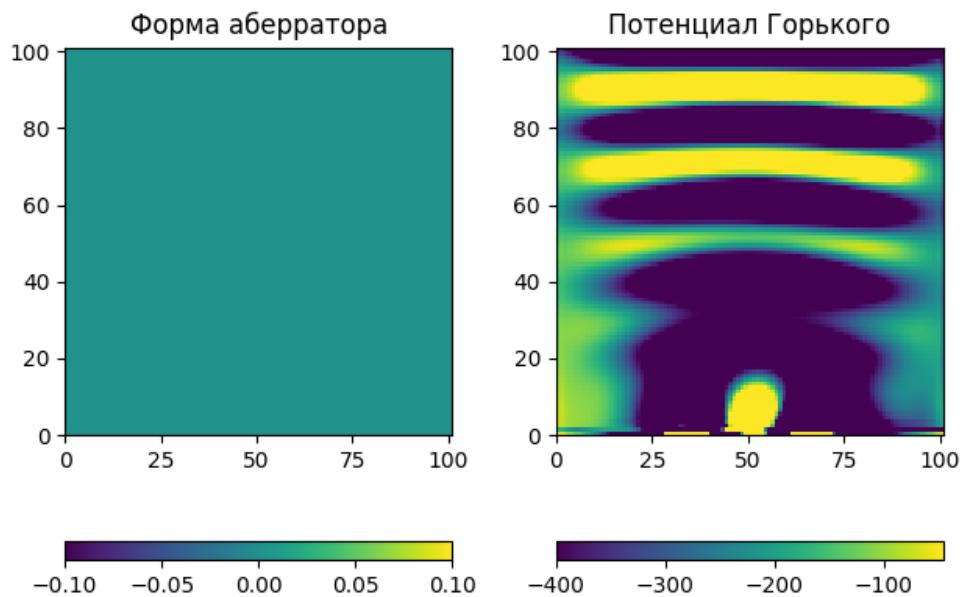


Рис. 17: Результат расчета для кольцевого пьезоэлемента 38 кГц без аберратора

Ниже на рисунках 18, 19, 20 приведены результаты моделирования параболического аберратора. Его ширина соответствует диаметру излучателя. Смотрия на результаты, можно сделать вывод, что параболических аберратор сам по себе не сильно меняет картину потенциала.

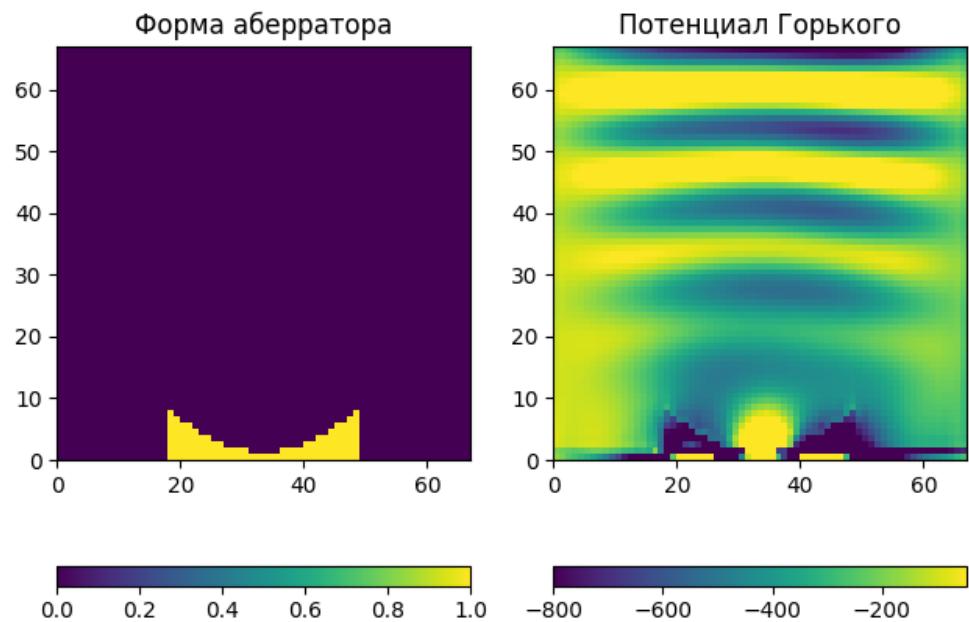


Рис. 18: Результат расчета для кольцевого пьезоэлемента 38 кГц, аберратор параболической формы

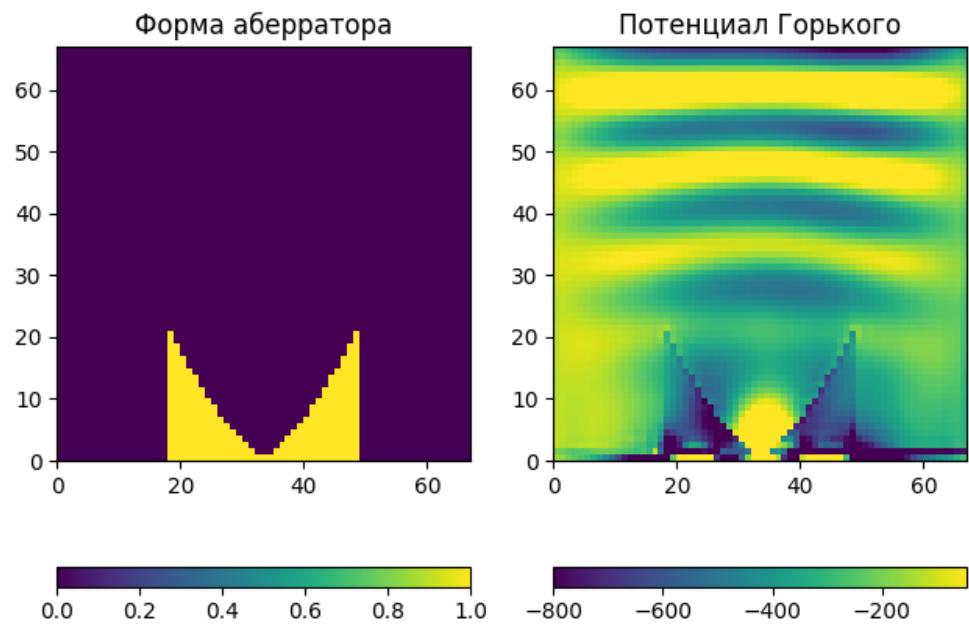


Рис. 19: Результат расчета для кольцевого пьезоэлемента 38 кГц, аберратор параболической формы

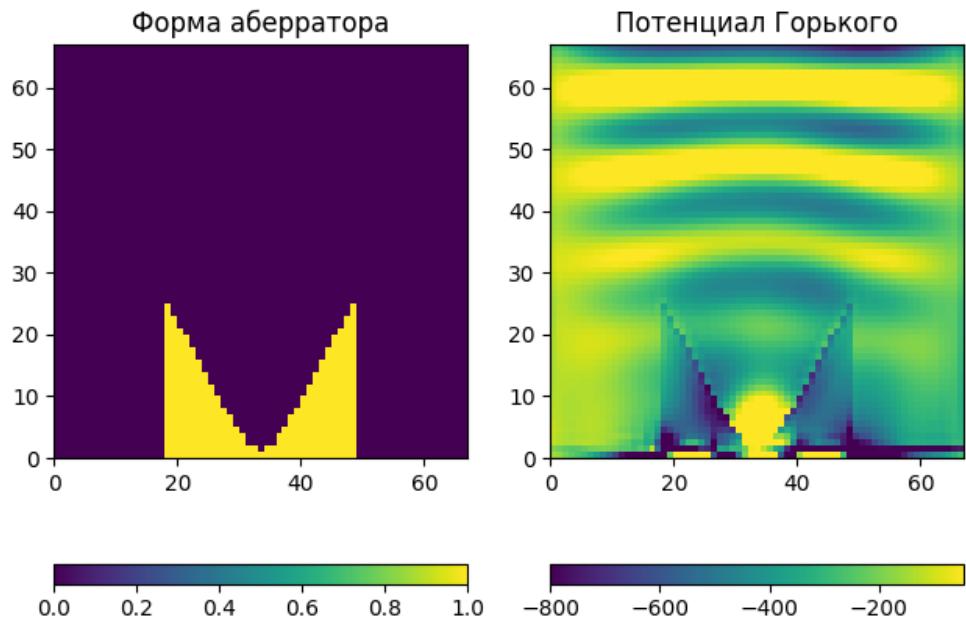


Рис. 20: Результат расчета для кольцевого пьезоэлемента 38 кГц, аберратор параболической формы

Наконец, для цилиндрического пьезоэлемента на 108 кГц рассмотрен аберратор в виде синусоидального профиля. Результаты представлены на рисунках 21, 22, 23, 24. Как видно из рисунков, количество периодов слабо влияет на получаемую картину потенциала. Интересным кажется случай на рис. 22 — в некоторых областях форма потенциала похожа на обратную форму аберратора.

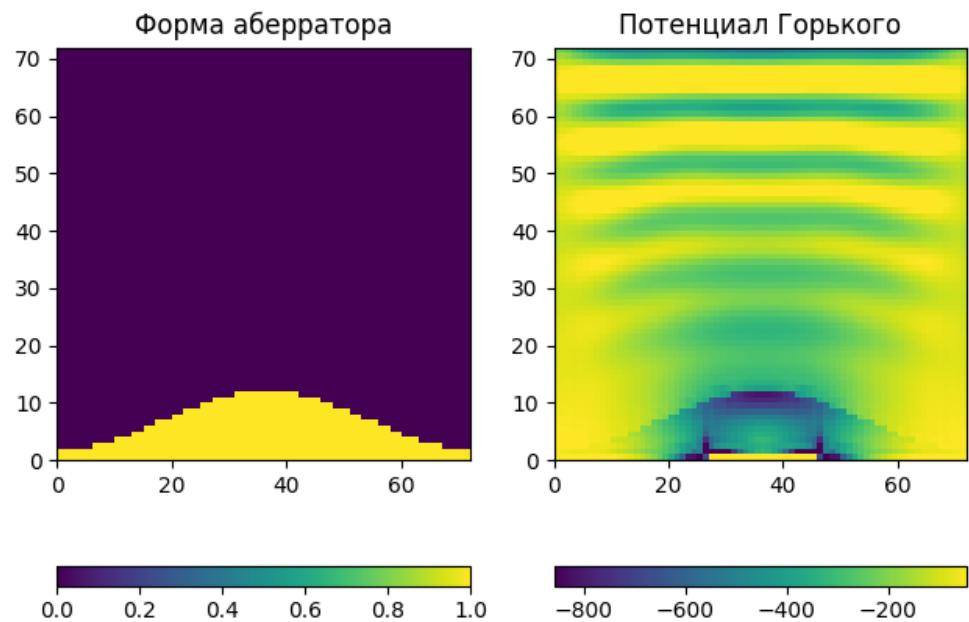


Рис. 21: Результат расчета для цилиндрического пьезоэлемента 108 кГц, аберратор синусоидальной формы

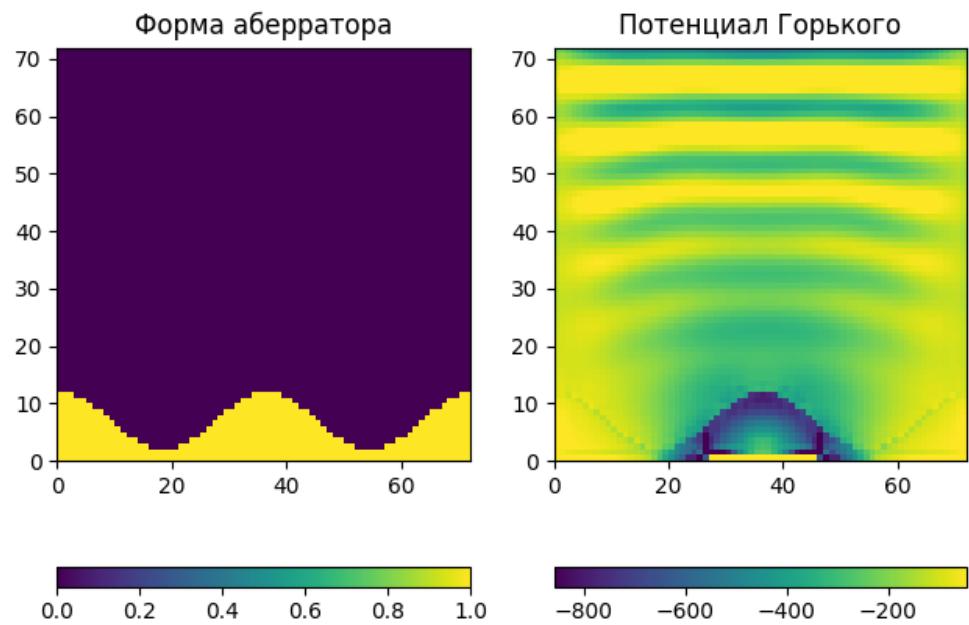


Рис. 22: Результат расчета для цилиндрического пьезоэлемента 108 кГц, аберратор синусоидальной формы

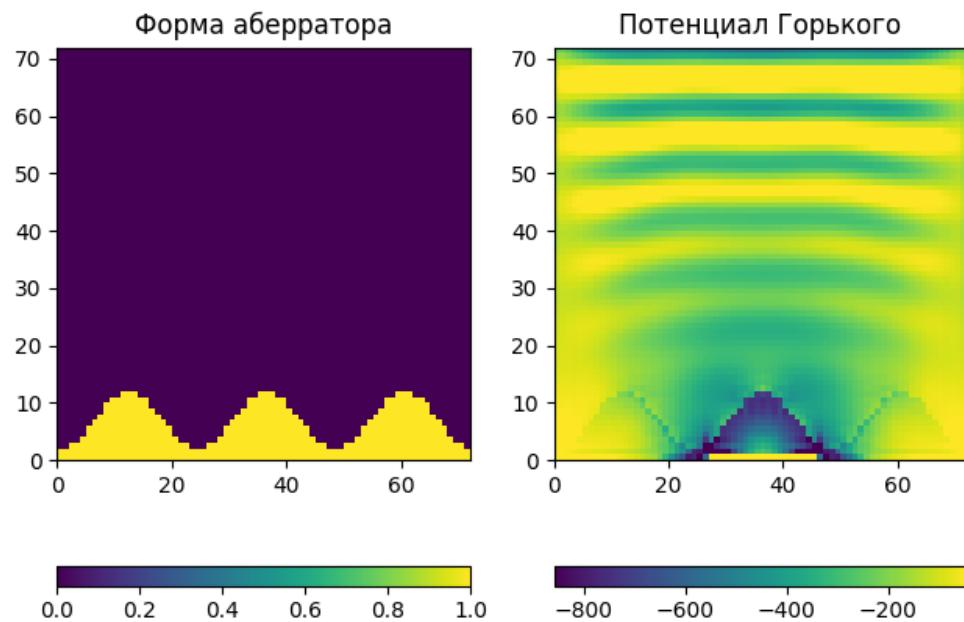


Рис. 23: Результат расчета для цилиндрического пьезоэлемента 108 кГц, aberrатор синусоидальной формы

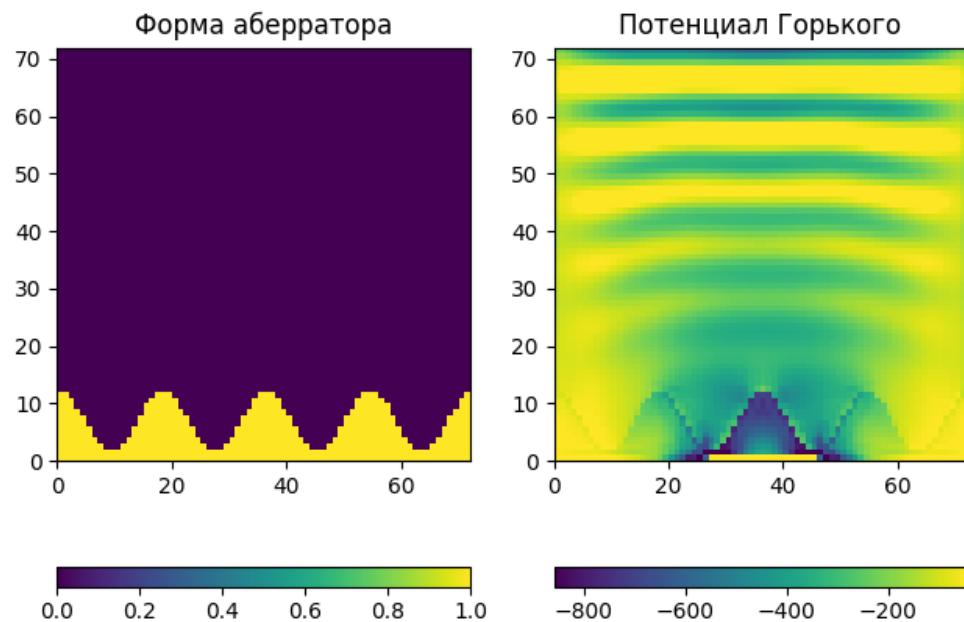


Рис. 24: Результат расчета для цилиндрического пьезоэлемента 108 кГц, aberrатор синусоидальной формы

## 5.2 Результаты физического эксперимента

К сожалению, автору не удалось получить устойчивую картину акустической левитации. Ни один из трех используемых пьезоэлементов не создал достаточно мощное поле. Наглядным показателем является рябь на воде при включении, однако она не наблюдалась. Это может быть связано с различными факторами. Например, неточно сконструированный согласующий слой, а именно наличие пузырьков в толще эпоксидной смолы или погрешность толщины. Однако наиболее вероятной причиной является недостаточная мощность усилителя. Об этом свидетельствует тот факт, что при работе он быстро (около 30 секунд) перегревается, ток после старта начинает падать, а синусоидальный сигнал искажается. При этом в слышимом диапазоне все три излучателя издавали достаточно громкий звук при работе, но, судя по всему, это не является показателем.

Самый близкий к удачному результат был получен с кольцевым пьезоэлементом на частоте 60 кГц при работе в сильно соленой воде. Была предпринята попытка довести плотность воды почти до плотности PLA-пластика, чтобы частички обладали почти нейтральной плавучестью. При опускании с поверхности, на несколько секунд наблюдалась практически полная остановка одной из частиц на некотором расстоянии над излучателем, но вскоре после этого частица утонула. На рисунке 25 можно наблюдать этот момент. Соленая вода была мутной, поэтому качество фотографии оставляет желать лучшего.



Рис. 25: Момент замедления частицы над излучателем

В связи с тем, что не удалось получить устойчивую картину в простейшем случае, физических экспериментов с аберратором проведено не было.

## 6 Заключение

Подводя итоги, перечислим основные результаты работы:

1. В ходе численного моделирования были получены различные картины потенциала Горькова для разных форм аберратора: полупериод косинуса, парабола, периоды синуса. В общем, можно сказать, что управление акустическим полем с помощью аберраторов возможно, но с отражателем плоской формы не очень эффективно.
2. Хотя физический эксперимент провести не удалось, получены ценные знания и опыт по созданию установки для акустической левитации. Было выявлено, что схема на основе усилителя мощностью 25 Вт для звуковой аппаратуры не достаточно для получения устойчивой картины стоячих волн в воде в условиях, рассмотренных в работе. Для хорошего усиления сигнала для пьезоэлемента нужны специализированные усилители для ультразвуковых частот. Помимо этого автором получен опыт пайки пьезоэлементов, печати форм и заливки их эпоксидной смолой. Было подтверждено, что эпоксидная смола хорошо подходит для электроизоляции и герметизации от воды.

## Список литературы

- [1] *Ruiken, Jan-Paul.* Drop Dissolution Intensified by Acoustic Levitation / Jan-Paul Ruiken, Jörn Villwock, Matthias Kraume // *Micromachines*. — 2024.
- [2] 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.
- [3] *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.
- [4] *Bos, Vincent.* Active damping for acoustic levitation in air / Vincent Bos, Jasper Wesselingh // *AIP Advances*. — 2024.
- [5] *Drewitt, James W. E.* MightyLev: An acoustic levitator for high-temperature containerless processing of medium- to high-density materials / James W. E. Drewitt, Barnaby Emmens // *Review of Scientific Instruments*. — 2024.
- [6] *Boudreaux, Taylor.* Biological Acoustic Levitation and Its Potential Application for Microgravity Study / Taylor Boudreaux, Luke Freyhof // *MDPI Biosensors*. — 2024.
- [7] *Zhang, Fuqiang.* The Experiment of Acoustic Levitation and the Analysis by Simulation / Fuqiang Zhang, Zelai Jin // *Open Access Library Journal*. — 2018.
- [8] Тотальный эндопротез коленного сустава - тип СВЛ. [https://tk-vector.ru/wp-content/uploads/2017/05/katalog\\_nahrada-kol-kloubu\\_SVL\\_RU.pdf](https://tk-vector.ru/wp-content/uploads/2017/05/katalog_nahrada-kol-kloubu_SVL_RU.pdf).
- [9] Influence of navigation system updates on total knee arthroplasty / Hiroshi Inui, Shuji Taketomi, Kensuke Nakamura et al. // *BMC Sports Science, Medicine, and Rehabilitation*. — 2013.
- [10] What is the optimal alignment of the tibial and femoral components in knee

arthroplasty? / Kirill Gromov, Mounim Korchi, Morten G Thomsen et al. // *Acta Orthopaedica*. — 2014.

- [11] *Лагунова, И. Г.* Рентгенанатомия скелета / И. Г. Лагунова. — Медицина, М., 1981, стр. 320–335.
- [12] *Polychronopoulos, Spyros.* Acoustic levitation with optimized reflective metamaterials / Spyros Polychronopoulos, Gianluca Memoli // *Nature*. — 2020.
- [13] *Кондауров, В.И.* Основы термомеханики конденсированной среды / В.И. Кондауров, В.Е. Фортов. — М., МФТИ, 2002.
- [14] *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.
- [15] *Горьков, Л. П.* О силах, действующих на малую частицу в акустическом поле в идеальной жидкости / Л. П. Горьков // *Доклады Академии наук СССР*. — 1961. — Vol. 140, no. 1.
- [16] *Магомедов, К. М.* Сеточно-характеристические численные методы / К. М. Магомедов, А. С. Холодов. — М.: Наука, 1988.
- [17] *Васюков, А. В.* GCM 3D. <https://github.com/avasyukov/naiveAcousticsGCM3D>.
- [18] *Nascimento, Valeria.* Influence of backing and matching layers in ultrasound transducer performance / Valeria Nascimento, Vera Button, Eduardo Tavares Costa // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. — 2003.
- [19] (TI), *National Semiconductor.* LM1875 Datasheet. <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/8681/NSC/LM1875.html>.
- [20] *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.

- [21] *Петров, И. Б.* Лекции по вычислительной математике / И. Б. Петров, А. И. Лобанов. — Интернет-университет информационных технологий, 2006.
- [22] *Ландау, Л.* Теория упругости / Л. Ландау, Е. Лифшиц. — Наука, 1965.
- [23] *Исакович, М. А.* Общая акустика / М. А. Исакович. — Наука, 1973.
- [24] *Noviello, C.* Mastering STM32 / C. Noviello. — LeanPub, 2022.