

Министерство образования и науки Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
Радиофизический факультет  
Кафедра радиофизики

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП  
д-р. физ. – мат. наук, профессор  
В. П. Якубов  
« 8 » 06 2018г.

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ ПУТЕМ ЧИСЛЕННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННОЙ  
ОБЛАСТИ

по основной образовательной программе подготовки магистров  
направление подготовки 03.04.03 – Радиофизика

Кузова Анжела Евгеньевна

Научный руководитель ВКР  
док. физ.-мат. наук, профессор  
Д.Я. Суханов  
подпись  
« 08 » 06 2018 г.

Автор работы  
студент группы № 721  
А.Е. Кузова  
подпись

Томск 2018

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 76 страниц, 33 рисунка, 20 формул, отчет о патентных исследованиях, список использованной литературы включает 61 наименование.

**МАССИВ ЧАСТИЦ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТЕТРАЭДРАЛЬНАЯ ЭКВИДИСТАНТНАЯ СЕТКА.**

Целью магистерской диссертации является разработка методов решения прямых и обратных задач акустической томографии на основе численного моделирования распространения акустических волн в упругих средах в модели динамики и взаимодействия частиц.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность разработки методов решения прямых и обратных задач на основе численного моделирования. В работе была разработана программа для численного моделирования акустических процессов `AcousticModel_OpenCL`. Был разработан метод решения обратных задач акустической томографии на основе скалярного умножения скоростей частиц. Проведенное численное моделирование подтвердило работоспособность метода. Были проведены эксперименты в воде по восстановлению точечных излучателей на основе обратного распространения волн, также был проведен эксперимент по восстановлению рассеивающей неоднородности в среде представляющей собой ступенчатую наклонную пластину. В результате эксперимента было получено томографическое изображение рассеивающей неоднородности на основе скалярного умножения скоростей частиц. Эксперименты подтвердили работоспособность предложенного метода.

## СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	2
ВВЕДЕНИЕ	5
1 Методы решения прямых и обратных задач акустического зондирования	9
1.1 Методы решения прямых задач	9
1.1.1 Метод конечных разностей во временной области для решения волнового уравнения	9
1.1.2 Метод функции Грина	10
1.1.3 Решение уравнения Гельмгольца в пространственном спектре плоских волн	12
1.2 Методы решения обратных задач	13
1.2.1 Приближение Борна и приближение Рытова.	13
1.2.2 Итерационный метод	13
1.2.3 Метод обращения времени	15
1.2.4 Метод дифракционного суммирования	15
1.3 Методы численного моделирования распространения акустических волн	16
1.3.1 Метод конечных элементов	16
1.3.2 Метод частиц в ячейках	17
1.3.3 Метод гидродинамики сглаженных частиц	17
1.3.4 Метод дискретных элементов	18
1.3.5 Метод полупериодических движущихся частиц	19
2 Решение прямой и обратной задачи акустической томографии на основе численного моделирования методом частиц	20
2.1 Описание решения прямой задачи с помощью разработанной программы AcousticModel_OpenCL	20
2.2 Экспериментальные исследования по измерению силы сжатия и	

растяжения металлического стержня из алюминия	22
2.3 Пересчет экспериментально полученной зависимости давления от сжатия – растяжения в силу взаимодействия между частицами в модели частиц	26
2.4 Код ядра программы AcousticModel_OpenCL	28
2.5 Моделирование распространения акустической волны в среде при наличии рассеивающей неоднородности.	32
2.6 Расчет скорости распространения акустической волны в среде	33
2.7 Решение обратной задачи на основе численного моделирования в программе AcousticModel_OpenCL	34
2.8 Восстановление изображения рассеивающей неоднородности в среде	36
2.9 Численное моделирование ультразвуковых волноводов	41
3 Экспериментальные исследования	44
3.1 Визуализация источников акустических волн в воде	44
3.1.1 Визуализация одиночного излучателя	45
3.1.2 Визуализация двух точечных излучателей	47
3.2 Восстановление изображения рассеивающего объекта	50
3.2.1 Визуализация наклонной пластины	51
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	56
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	57
ПРИЛОЖЕНИЕ Отчет о патентных исследованиях	64

## ВВЕДЕНИЕ

Применение методов акустической томографии позволяет получить послойное изображение внутренней структуры изучаемого объекта при многократном зондировании акустическими волнами. К акустической томографии относятся различные методы решения обратных волновых задач акустики.

Восстанавливаемым изображением объекта и самим объектом исследования могут быть пространственные распределения любых параметров среды, которые вызывают изменения распространяющихся в этой среде акустических волн - это изменения плотности, температуры, скорости звука, коэффициент преломления и отражения звука и т.д.

Акустическая томография находит широкое применение в медицине для диагностики и визуализации биологических органов, в неразрушающем контроле для обнаружения дефектов различных сплавов и конструкций, при изучении океана для измерения пространственного распределения плотности, солёности, температуры и скорости течений в водной среде [1-6].

Акустическая томография находит широкое применение и в дефектоскопии при решении обратных задач – по измеренному сигналу, рассеянному на неоднородности определить ее форму и характеристики. Наибольшее распространения получили обратные задачи излучения [7-9], рассеяния [10-12], и граничные обратные задачи [13-16], в различных постановках. Обратные задачи не всегда имеют однозначное решение, и крайне чувствительны к шумам измерений и несоответствиям математической модели и условий зондирования среды.

Большинство существующих методов ультразвуковой томографии используют локационный принцип зондирования, в котором объекты визуализируются по обратно рассеянным волнам при одностороннем доступе к объекту. Существуют также трансмиссионные схемы ультразвуковой томографии для определения плоских теневых изображений исследуемых

объектов[17-18]. Часто для решения обратных задач томографии применяется приближение геометрической оптики [19-20].

Наиболее универсальным методом обработки данных ультразвукового зондирования является метод пространственно - согласованной фильтрации [21-22]. За счёт измерения поля во множестве различных точек пространства и обеспечивается возможность синтеза апертуры и получение изображений с разрешением сравнимым с длиной волны. Данный метод работает в частотной области и для сверхширокополосных сигналов требователен к вычислительным ресурсам. Однако есть частные случаи схем зондирования, когда возможна быстрая обработка сигналов и получение трёхмерных изображений, например метод Столта [23]. Для обработки сигналов при короткоимпульсном зондировании применяется метод миграции во временной области, или метод суммирования дифракционных гипербол [24]. Данный метод достаточно универсален, и может учитывать любые комбинации положений излучателей и приёмников. Подобные методы являются относительно быстродействующими, однако не позволяют учесть влияние фоновых неоднородностей и нелинейных искажений.

**Актуальность:** В настоящее время актуальна разработка методов численного моделирования акустических процессов, позволяющих учитывать все возможные волновые эффекты и нелинейные процессы. Это связано с высокой чувствительностью ультразвуковых волн к наличию механических неоднородностей среды. Актуальной задачей является поиск методов и алгоритмов позволяющих учитывать влияние фоновых неоднородностей среды, обеспечивать устойчивость решения к неизбежным ошибкам измерения, возможность учета нелинейных эффектов, а также возможность реализации алгоритма средствами современной вычислительной техники.

**Цель:** Разработать метод решения прямых и обратных задач акустической томографии на основе численного моделирования

распространения акустических волн в упругих средах в модели динамики и взаимодействия частиц.

**Задачи:**

1. Разработать численную модель распространения акустических волн в неоднородной среде.
2. Разработать метод томографии источников и рассеивателей на основе решения обратных задач акустического зондирования в неоднородных средах с применением разработанной численной модели распространения акустических волн.
3. Провести экспериментальную проверку разработанного метода.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Численное моделирование акустических процессов на основе массива частиц и уравнения движения Ньютона при обращении времени позволяет, представляя приёмники ультразвукового поля в виде источников принятого ими сигнала на поверхности объекта, визуализировать источник акустического возмущения внутри объекта.
2. Акустическая томография рассеивающих неоднородностей реализуется на основе интеграла по времени от скалярного произведения скоростей соответствующих частиц в однородной среде, с распространяющейся в ней волной от излучателя и скоростей частиц в волне обратного распространения в неоднородной среде, рассчитываемой по измеренному полю путём численного моделирования.

**Достоверность** научных положений и других результатов работы подтверждается тем, что:

1. Достоверность метода численного моделирования распространения акустических волн в твердом теле, в котором имеется рассеивающий объект (неоднородность) подтверждается отражением волн от неоднородности согласно закону Снеллиуса.
2. Достоверность первого положения подтверждена экспериментально путем восстановления изображения точечного излучателя в среде.

3. Достоверность второго положения подтверждена экспериментально путем восстановления изображения рассеивающей неоднородности.

#### **Научная новизна результатов работы**

1. Предложенный метод численного моделирования твердого тела в виде массива частиц в тетраэдральной эквидистантной сетке в сочетании с уравнением движения Ньютона при обращении времени позволяет учитывать эффект дифракции и отражения волн от объекта произвольной формы.

2. Предложен метод восстановления рассеивающих неоднородностей в среде на основе скалярного произведения скоростей частиц однородной среды и волны обратного распространения рассчитываемой на основе измеренного поля.

3. Предложенный метод численного моделирования позволяет восстанавливать не только источники акустических возмущений (А.Л. Вировлянский, А.Ю.Казарова,2012) но и рассеивающие неоднородности в среде.

#### **Практическая значимость**

Метод ультразвуковой томографии на основе скалярного произведения скоростей частиц однородной среды с распространяющейся в ней волной от излучателя и волны обратного распространения, рассчитываемой на основе измеренного поля, позволяет учитывать влияние фоновых неоднородностей и нелинейных искажений, в отличие от метода Столта и метода миграции во временной области.

#### **Апробация результатов работы**

Результаты работы докладывались и обсуждались на 2 конференциях, также по теме работы опубликовано 2 статьи в журналах индексируемых в базе цитирования «Scopus».



## 1. Методы решения прямых и обратных задач акустического зондирования

Прямая задача заключается в регистрации поля излученного точечным источником. Решение прямой задачи гарантированно, она решается однозначно результаты экспериментальных измерения, чаще всего и есть решения прямой задачи. Решение обратной задачи – по измеренному сигналу, рассеянному на неоднородности определить ее форму и характеристики не является однозначным. Обратные задачи крайне чувствительны к шумам измерений и несоответствиям математической модели и условий зондирования среды. В большинстве случаев решить обратную задачу можно только в том или ином приближении, и чем точнее получено приближенное решение соответствующее экспериментальным данным, тем точнее решена обратная задача. Чаще всего решения обратной задачи это есть некоторое приближенное решение прямой задачи.

Для решения обратных задач получили широкое распространения методы численного моделирования: метод конечных разностей во временной области [25 -29], метод конечных элементов [30-32], метод частиц в ячейках [33 -35]. Обратные задачи можно разделить на 4 класса: коэффициентные обратные задачи, когда коэффициенты в уравнении или правая часть уравнения неизвестны, граничные обратные задачи применяются, когда прямые измерения на границе невозможны, эволюционные обратные задачи в которых происходит идентификация начальных условий для случая, когда этих условия недостаточно для формулировки прямой задачи.

### 1.1 Методы решения прямых задач

#### 1.1.1 Метод конечных разностей во временной области для решения волнового уравнения

Метод КРВО основан на дискретизаций дифференциальных уравнений в пространстве и во времени. В методе КРВО решение ищется в узлах

многомерной сетки, что приводит к необходимости использования мощных высокопроизводительных ЭВМ с объемом оперативной памяти в сотни и тысячи мегабайт. В связи, с чем актуальна проблема разработки алгоритмов, позволяющих производить расчеты на сетках с крупным шагом, что приведет к уменьшению объема требуемой оперативной памяти и сократит время вычислений.

Решение при использовании метода КРВО находится по следующему алгоритму:

1. На исследуемую область накладывается сетка, и решение ищется в узлах наложенной сетки.
2. Расчет проводится алгоритмом, содержащим количество узлов использованных для вычисления производной по координате и по времени.

В настоящее время метод широко используется как для решения электродинамических, так и акустических задач. Преимущества метода КРВО – возможность моделирование нестационарных волновых процессов в вязкоупругих, неоднородных, анизотропных и нелинейных средах,

- возможность расчета волн в задачах со сколь угодно сложными граничными условиями,
- получение решений во времени (с некоторым дискретным шагом  $t$ )
- относительно простой алгоритм вычислений, который легко реализуется на ЭВМ.

Метод КРВО имеет свои недостатки: 1 склонен к накоплению ошибок вычислений, за счет погрешностей округления чисел и приближений, принятых в расчетах, 2 возникает шум решений, 3 ложные волновые процессы.

### 1.1.2 Метод функции Грина

Метод функции Грина применяется для решения неоднородных дифференциальных уравнений с граничными условиями неоднородной краевой задачей [36 - 37]. Данный метод позволяет найти решение

неоднородного уравнения, удовлетворяющее однородным краевым условиям. Определения функции Грина сводится к исследованию свойств дифференциального оператора и изучению аналогичных свойств соответствующего оператора.

Рассмотрим функцию Грина для волнового уравнения

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = -4\pi f(x, t) \quad (1)$$

где  $f(x, t)$  описывает распределение источников, а  $c$  представляет собой скорость распространения волн в пространстве. Для решения уравнения найдем функцию Грина. Так как поля зависят и от времени, функция Грина будет зависеть от переменных  $(x, x', t, t')$  и удовлетворяет уравнению

$$\left(\nabla_x^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) G(x, t; x', t') = -4\pi \delta(x - x') \delta(t - t') \quad (2)$$

Решение уравнения (1) в неограниченном пространстве без граничных поверхностей выражается через  $G$  интегралом

$$\psi(x, t) = \int G(x, t; x', t') f(x', t') d^3x' dt' \quad (3)$$

Функция Грина, удовлетворяющая уравнению (2) зависит только от разностей координат  $(x - x')$  и времени  $(t - t')$ . Функция Грина, удовлетворяющая уравнению (2), представляет собой волновое возмущение, вызванное точечным источником, находящимся в точке  $x'$  и излучающим только в течение бесконечно малого интервала времени при  $t = t'$ . Такое волновое возмущение распространяется со скоростью  $c$  в виде расходящейся сферической волны. Таким образом, функция Грина будет равна

$$G = \frac{1}{R} \delta\left(\tau - \frac{R}{c}\right) \quad (4)$$

### 1.1.3 Решение уравнения Гельмгольца в пространственном спектре плоских волн

Уравнение Гельмгольца – это эллиптическое дифференциальное уравнение в частных производных [38].

$$\Delta u + k^2 u = 0 \quad (5)$$

где  $\Delta$  - оператор Лапласа,  $k$  - постоянная. При  $k=0$  уравнение Гельмгольца переходит в уравнение Лапласа. Уравнение Гельмгольца можно получить из волнового уравнения, если описать зависимость от времени функций  $\exp(-i\omega t)$ , тогда  $k = \omega / c$ . Для уравнения Гельмгольца в ограниченной области применяются условия Дирихле и Неймана. Значения,  $k$  при которых существует отличное от нуля решение однородного уравнения Гельмгольца называются собственными значениями оператора Лапласа. Для таких значений  $k$  решение краевой задачи не единственно.

При помощи функции Грина краевую задачу можно свести к интегральному уравнению. При решении краевых задач для уравнения Гельмгольца применяются такие методы как сведение к интегральному уравнению, вариационный метод, метод конечных разностей. В случае неограниченной области для уравнения Гельмгольца применяются внешние краевые условия, которые имеют единственное решение, стремящееся к нулю на бесконечности. Если решение на бесконечности не является единственным, то для выделения единственного решения вносятся дополнительные условия.

В спектре плоских волн решение уравнения Гельмгольца записывается для произвольной дальности следующим образом:

$$\tilde{U}(k_x, k_y, z) = \tilde{U}(k_x, k_y, 0) \exp(ik_z z) \quad (6)$$

где  $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$ .

## 1.2 Методы решения обратных задач

### 1.2.1 Приближение Борна и приближение Рытова.

Самые первые методы решения обратных задач основаны на приближении однократного рассеяния (приближение Борна) и плавного изменения характеристик рассеяния (приближение Рытова) [39-41]. При решении обратных задач данными методами линеаризующее уравнение рассеяния, сводится к решению уравнения Фредгольма I рода. Преимуществом борновского приближения является возможность получения решения обратной задачи в аналитическом виде, а точнее к возможности свести задачу к решению системы линейных уравнений с матрицей, элементы которой выражаются аналитически, при линеаризации исходного уравнения. Однако уравнения рассеяния линеаризуется лишь для весьма слабых включений, акустические характеристики которых разнятся на доли процента от характеристик окружающей среды (в случае протяженных рассеивателей, наиболее часто встречающихся на практике). Приближение Рытова применяется, когда характеристики среды слабо изменяются на расстоянии сравнимом с длиной волны. Суть этого метода состоит, в том, что на препятствиях рассеяние облучающего поля назад происходит очень слабо.

Однако предположения, используемые в этих приближениях, накладывают серьезные ограничения на область их применимости. Дальнейшие исследования, связанные с учетом эффектов многократного рассеяния, показали, что обратная задача рассеяния является некорректной и нелинейной относительно неизвестных функций.

### 1.2.2 Итерационный метод

Широкое распространения при решении обратных задач получил итерационный метод [42-46]. Суть, которого заключается в решении ряда линейных уравнений, число которых определяется количеством итерационных шагов, необходимых для обеспечения заданной точности.

Обязательным условием для итерационного процесса является сходимость. При рассмотрении сходимости различных алгоритмов, при решении обратных задач было получено, что все способы непосредственного итерирования, имеют одинаковый радиус сходимости. Итерационный алгоритм сходится, если рассеянное поле внутри рассеивателя ни в одной точке не превосходит по модулю поле зондирующее. Из анализа решения обратных задач при наличии неоднородностей в среде следует, что характер сходимости близок к экспоненциальному, причем степень этой близости возрастает по мере приближения к верным значениям.

При построении итерационного метода необходимо стремиться к минимизации вычислительной работы по нахождению приближенного решения задачи с заданной точностью.

Итерационные методы обладают рядом преимуществ: возможность использования фрагментарных данных, полученных при различной геометрии эксперимента, различных частотах. При применении итерационных методов не накладывается жестких требований на полноту данных рассеяния отдельно для, каждой из частот или каждой конфигурации падающего поля в эксперименте, любая априорная и апостериорная информация может быть также использована.

Применение данных методов имеет определенные ограничения:

1. Для сильных рассеивателей сходимость итераций может быть обеспечена за счет увеличения объема вычислений.
2. При использования фрагментарных данных, возникает необходимость решения множества вспомогательных задач для каждого из положений источника или каждой из частот, что приводит к увеличению размерности и сложности вычислительных операций.

### 1.2.3 Метод обращения времени.

В настоящее время все чаще используется метод обращения времени, в частности при решении задач мониторинга неоднородных сред [47-49]. Использование данного метода позволяет осуществлять фокусировку полей, применяемую например, в активной локации.

Метод временного обращения волн (ВОВ) состоит из двух этапов. На первом этапе в среду с помощью пробного источника излучается тестовый сигнал, после чего в некоторых точках производится когерентное измерение волнового поля. На втором этапе принятые сигналы излучаются обратно в среду в тех точках, где они были приняты, с изменением знака времени.

Метод обращения времени позволяет получать изображение пробного источника в неоднородных средах без априорного знания характеристик среды. Для сред, в которых имеются неоднородности и границы повышается эффективность фокусировки поля, но приводит к возникновению помех, как во временной — корреляционного шума так и в пространственной области — ложных интерференционных максимумов. Наибольший интерес представляет изучение динамики и структуры обращенного поля в системах конечных размеров. На сегодняшний день этот вопрос практически не изучен.

### 1.2.4 Метод дифракционного суммирования

Метод дифракционного суммирования основан на суммировании сигналов вдоль гиперболы и заключается в следующем [24, 50]. Производится последовательное сканирование точек рассеяния в среде и для каждой точки вычисляется, а на практике — измеряется, форма дифракционной гиперболы, зависящая от времени задержки рассеянного импульса и положения точки зондирования. Следующий шаг состоит в суммировании измеренного сигнала по дифракционной гиперболе. В результате дифракции каждый точечный рассеиватель, находящийся в

однородной среде, отображается в виде гиперболы. В этом случае истинное положение рассеивателя соответствует вершине гиперболы. Операция фокусировки перемещает отражения в их истинные позиции, убирая эффект дифракции, тем самым увеличивая пространственное разрешение и позволяя получить изображение. Если в точке фокусировки присутствует реальная неоднородность, то отклик (сумма) будет тем заметнее, чем больше неоднородность. Если цели в текущей точке нет, то результатом суммирования будет являться усредненный шум.

Метод дифракционного суммирования является универсальным и простым в реализации, позволяет легко учитывать не только неровности поверхности, но и разную скорость распространения радиоволн в слоистой среде. Основной его недостаток – большой объем вычислений, что требует заметных затрат на время реконструкции томограммы. Для восстановления одной точки трёхмерного изображения требуется осуществлять суммирование по двумерному сигналу, то есть размерность вычислений имеет 5 степеней.

### 1.3 Методы численного моделирования распространения акустических волн

#### 1.3.1 Метод конечных элементов

Метод конечных элементов возник в 1950 году, но из-за низкого уровня вычислительной техники долгое время не имел широкого применения. Данный метод схож с методом КРВО. В этом методе исследуемая область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное количество подобластей (элементов). Для каждой области выбирается произвольно свой вид аппроксимирующей функции. Решением задачи являются значения функций в узлах и заранее неизвестны. Для нахождения неизвестных значений функций в узлах составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений эквивалентно



количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, и ограничивается только возможностями ЭВМ. Каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних элементов вследствие чего, система линейных алгебраических уравнений имеет разреженный вид, что существенно упрощает её решение.

Метод конечных элементов позволяет задавать произвольную форму обрабатываемой области; В данном методе, возможно, регулировать сетку и в местах, где особая точность не нужна, сетку можно сделать реже.

### 1.3.2 Метод частиц в ячейках

Метод частиц в ячейках применяется для решения дифференциальных уравнений в частных производных. Метод разработан в середине 50-х годов Харлоу в Лос-Аламосской лаборатории. При моделировании исследуемая среда представляется в виде конечного множества модельных частиц. Каждая частица является носителем некоторого набора характеристик — атрибутов данной среды.

Метод частиц в ячейках широко применяется для решения задач физики плазмы. Данный метод обладает рядом преимуществ: 1 метод физически нагляден, 2 довольно прост в реализации, 3 менее затратен по сравнению с конечно-разностным методами и методами частица-частица.

### 1.3.3 Метод гидродинамики сглаженных частиц

Метод гидродинамики сглаженных частиц (The smoothed particle hydrodynamics (SPH)) – метод численного моделирования получивший широкое распространение в гидродинамике при моделировании жидкостей [51 - 53]. В методе SPH вместо сетки используется набор интерполяционных точек помещенных произвольно в жидкость, что позволяет использовать

данный метод при моделировании потока жидкости со свободной поверхностью и движущимися границами.

Суть метода заключается в том, что жидкость представляется как множество частиц, обладающих такими физическими параметрами как скорость, плотность, давление, перемещение. Метод SPH позволяет вычислять производные без вычислительной сетки.

Основные преимущества метода:

1. Адаптивный характер достигается на ранней стадий на каждом временном шаге, исходя из текущего локального произвольно распределенного множества частиц, что позволяет обрабатывать большие деформации.
2. Взаимодействия между частицами учитываются без применения вычислительной сетки.
3. Применение приближения частиц позволяет материалу свободно перемещаться в пространстве из – за внешних сил и внутреннего взаимодействия.

#### 1.3.4 Метод дискретных элементов

Метод дискретных элементов (DEM) – является Лангранжевым методом на основе частиц, основанный на приложении законов Ньютона и контактной механики [51]. Данный метод получил широкое распространение для моделирования механического поведения твердых частиц, сыпучих и зернистых материалов.

Преимуществом метода дискретных элементов является:

1. В отличие от непрерывных моделей применение данного метода не нарушает сплошности вещества.
2. Данный метод является универсальным и имеет практически неограниченные возможности для диагностики моделируемых явлений.

### 1.3.5 Метод полупериодических движущихся частиц

Метод полупериодических движущихся частиц (MPS - метод) – макроскопический метод детерминированных частиц (метод Лангранжевой сетки) [51]. Данный метод получил наибольшее распространение для решения уравнения Навье – Стокса. Каждый временной шаг разбивается на два этапа прогнозирования и коррекции – метод дробной ступени.

В методе полупериодических движущихся частиц жидкость представляется в виде множества частиц и движения каждой частицы рассчитывается на основе взаимодействия с соседними частицами.

## 2. Решение прямой и обратной задачи акустической томографии на основе численного моделирования методом частиц

### 2.1 Описание решения прямой задачи с помощью разработанной программы AcoousticModel\_OpenCL

Разработана программа для численного моделирования распространения акустических волн в твердых телах AcoousticModel\_OpenCL. В которой твердое тело представляется в виде массива частиц в тетраэдральной эквидистантной сетке, динамика которых описывается уравнениями движения Ньютона [54]. Силы взаимодействия между частицами описываются силовым графиком, показывающим зависимость силы притяжения между частицами от расстояния. Разработанная программа AcoousticModel\_OpenCL предназначена для решения прямой и обратной задачи.

Принцип работы программы для решения прямой задачи: В начальном состоянии имеется стабильная эквидистантная сетка, в которой расстояние между всеми ближайшими частицами одинаковы и равны  $d$ . Пространственное размещение частиц, представлено на рисунке 1. Считаем, что частицы взаимодействуют только с ближайшими соседями. Для рассматриваемой решётки у каждой частицы будет 12 соседей.

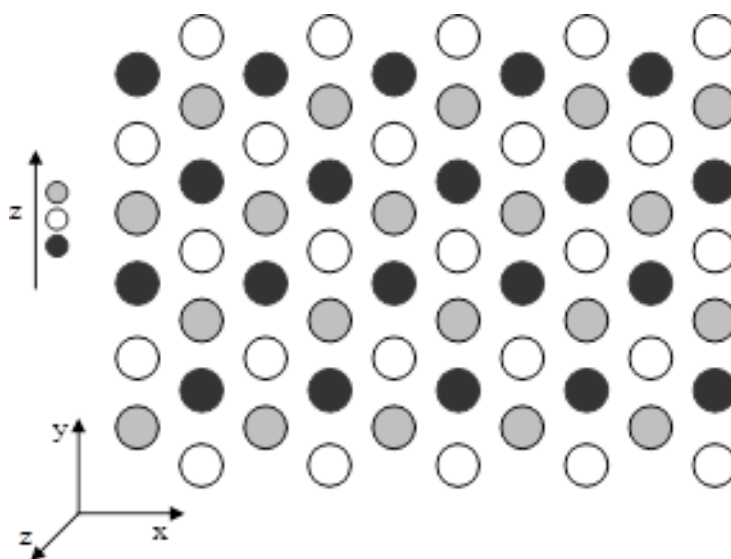


Рисунок 1 – Структура рассматриваемой кристаллической решётки

Характерный вид структуры, которую имеет данное вещество, определяется силами взаимодействия и расстоянием между его молекулами. Между молекулами могут действовать как силы притяжения, так и силы отталкивания. Данная зависимость описывается формулой (7).

$$F(x) = (1 - d/x)(d\sqrt{2} - x)^2 \quad (7)$$

где  $d$  - расстояние между частицами,  $F(x)$  - сила взаимодействия между частицами,  $x$  - координата частицы.

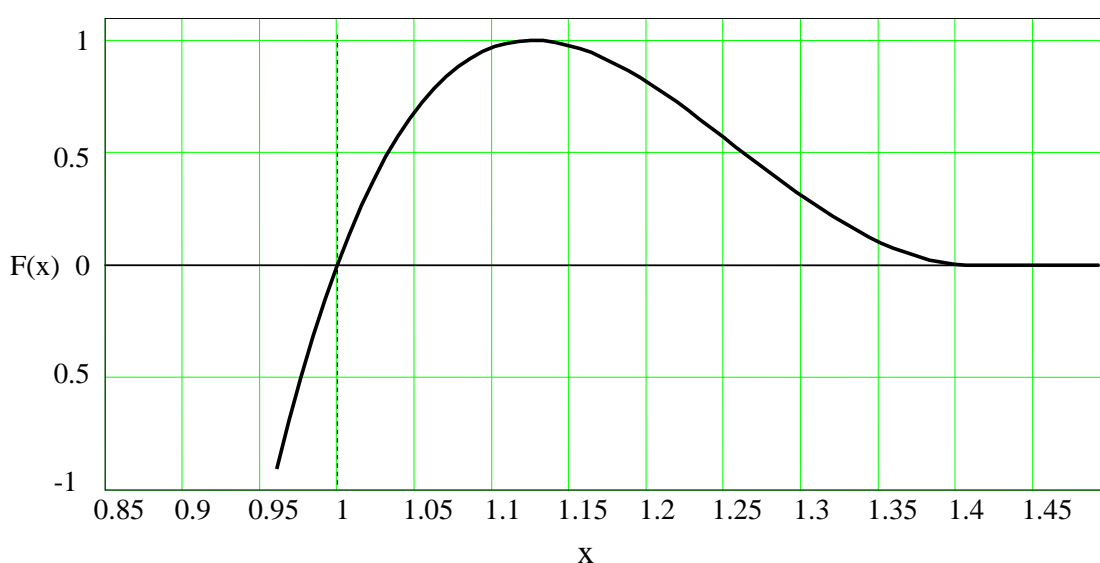


Рисунок 2 – Зависимость силы притяжения между частицами от расстояния

Видно, что при расстоянии  $d$  между частицами, сила взаимодействия равна нулю, а значит, невозмущённая структура будет неподвижна. Вблизи точки равновесия сила притяжения зависит линейно от расстояния, что позволяет моделировать линейные акустические процессы и в линейном приближении оценить скорость распространения продольных волн.

Представленный на рисунке 2 график зависимости силы притяжения от расстояния между частицами был получен в результате численного моделирования и анализа сил взаимодействия между частицами, в частности был произведен анализ сил взаимодействия в реальных газах поведение которых описывается силами Ван – Дер – Вальса [55].

Источник акустического сигнала рассматривается в виде плоской волны излучаемой в прямом направлении оси  $Z$ . Плоская волна, распространяясь от источника в среде, сталкивается с рассеивающей неоднородностью, дифрагирует и отражается. Часть рассеянного поля попадает в приемные датчики, в которых измеряется скорость частиц, и их отклонение в кристаллической решётке в зависимости от времени. Приёмные датчики располагаются на плоскости  $Z = 0$  с шагом равным шагу размещения частиц.

## 2.2 Экспериментальные исследования по измерению силы сжатия и растяжения металлического стержня из алюминия

В томском региональном центре коллективного пользования были проведены физико-механические испытания на растяжения и сжатия цилиндрического образца из алюминия в рамках проекта «Создание высокотехнологичного комплекса ультразвуковой хирургии» (Уникальный идентификатор проекта RFMEF157517X0163). Испытания на сжатие проводят на образцах четырех типов: цилиндрических и призматических (квадратных и прямоугольных), с гладкими торцами и торцевыми выточками [56]. Тип и размер образца выбирают по таблице ГОСТ 25.503-97.

Для испытания на растяжение применяют пропорциональные цилиндрические или плоские образцы диаметром или толщиной в рабочей части 3,0 мм и более с начальной расчетной длиной  $l_0 = 5,65$  или  $l_0 = 11,3$ . Применение коротких образцов предпочтительнее. Типы и размеры пропорциональных цилиндрических и плоских образцов приведены в приложениях ГОСТ 1497-84.

Испытания цилиндрических образцов проводилось на универсальной электромеханической испытательной машине Instron 3369 [57] представленной на рисунке 3.



Рисунок 3 – Универсальная электромеханическая испытательная машина Instron 3369

Установка позволяет проводить механические испытания различных материалов на растяжение и сжатие. Система оснащена климатической камерой (300...523 К) и усовершенствованным видеоэкстензометром, который разработан для точного измерения деформации без необходимости контакта с образцом (максимальное поле зрения – 500 мм).

В результате проведенных измерений на растяжения и сжатия алюминиевого стержня длиной 20мм были получены графики зависимости напряжения от деформации стержня рисунок 4а, рисунок 4б и график зависимости нагрузки от перемещения рисунок 5а, рисунок 5б.

### Испытание на растяжение

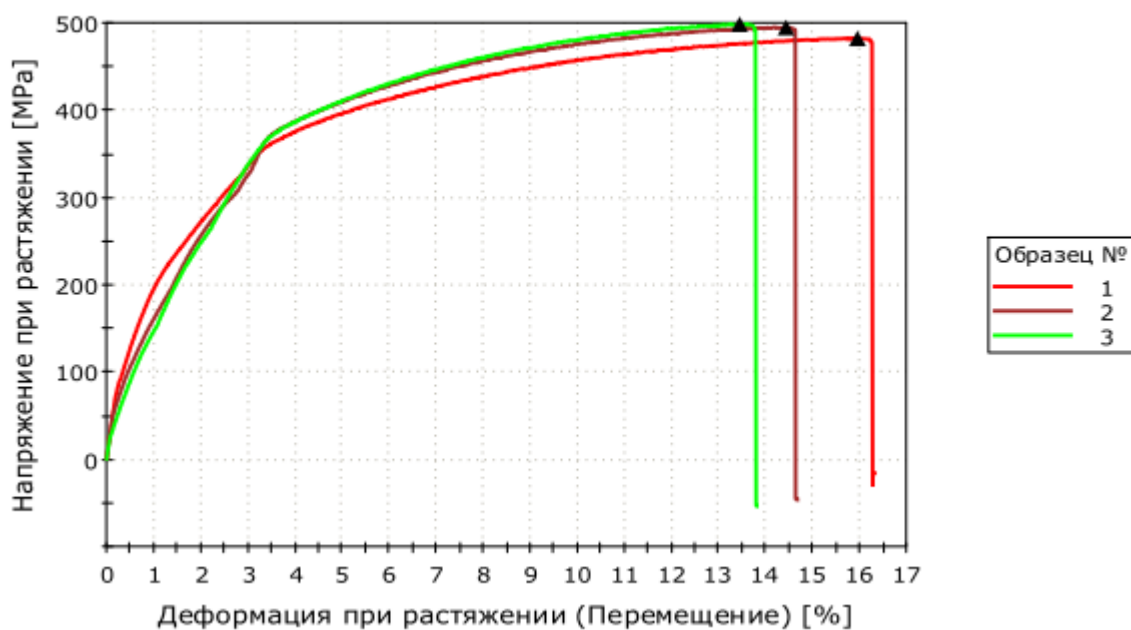


Рисунок 4а – График зависимости напряжения от деформации при растяжении

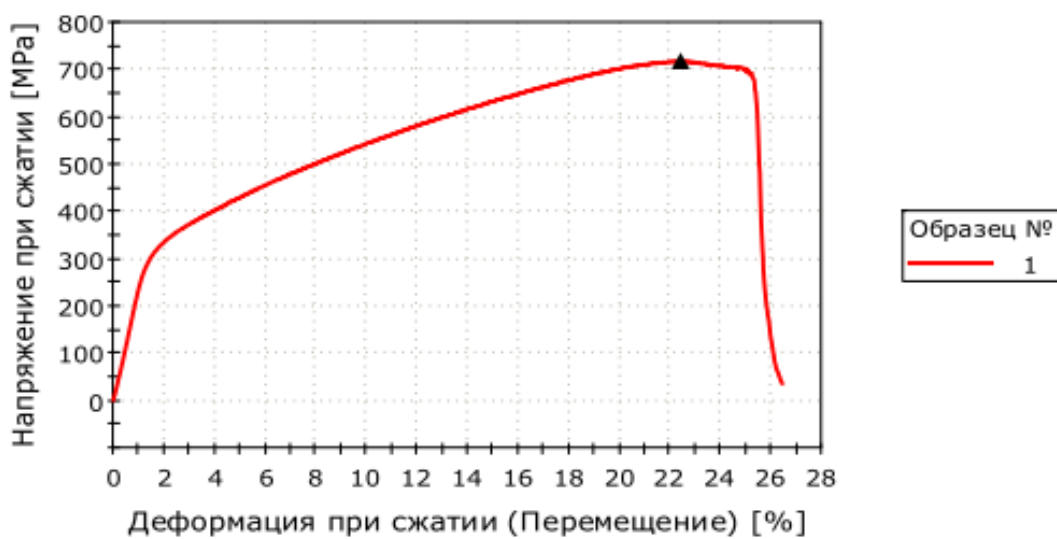


Рисунок 4б – График зависимости напряжения от деформации при сжатии



испытание на растяжение

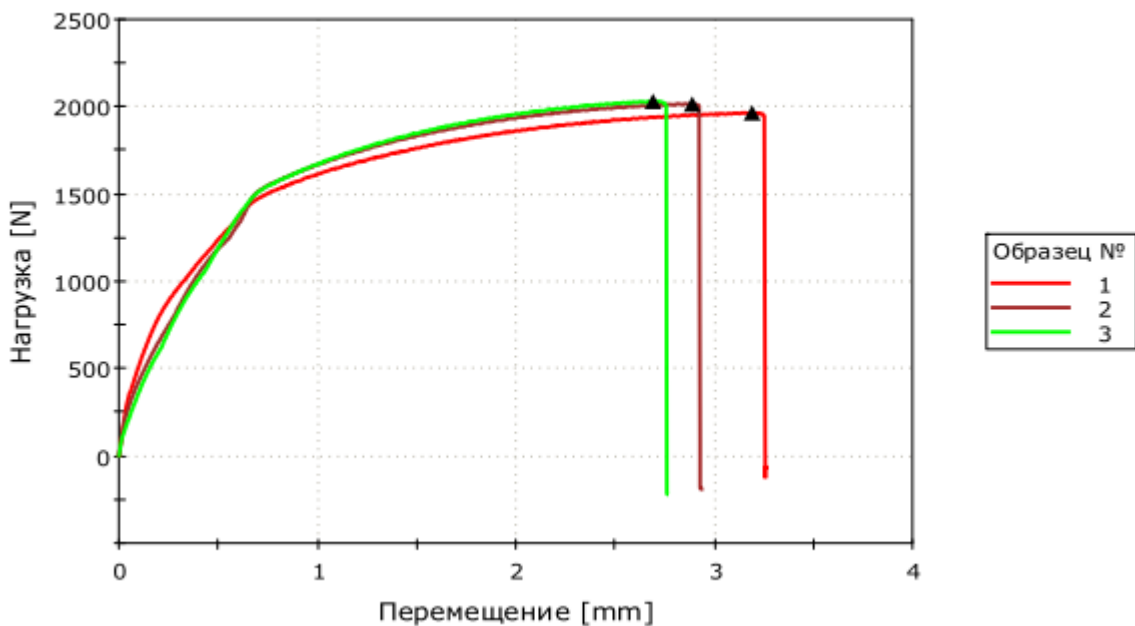


Рисунок 5а – График зависимости нагрузки от перемещения при растяжении

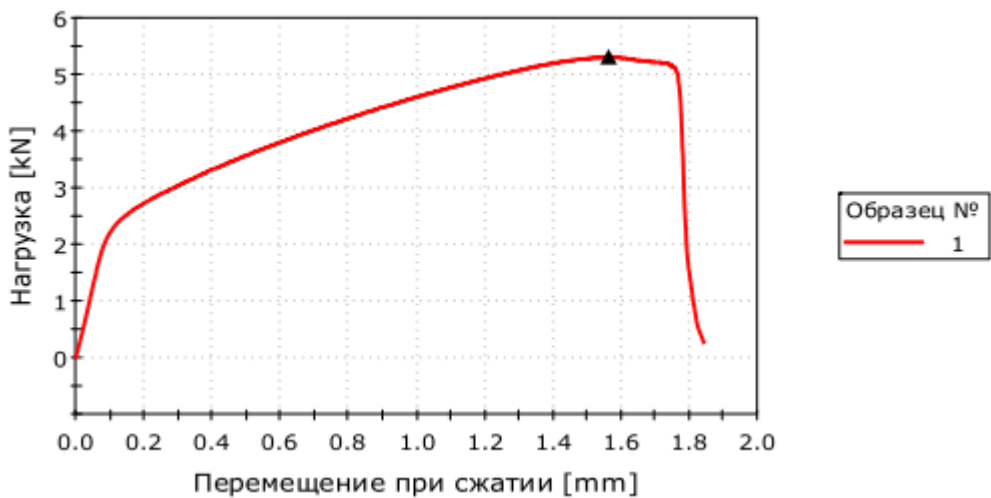


Рисунок 5б – График зависимости нагрузки от перемещения при сжатии

### 2.3 Пересчет экспериментально полученной зависимости давления от сжатия – растяжения в силу взаимодействия между частицами в модели частиц

В работе рассматривается тетраэдральная сетка, для расчета сил взаимодействия частиц рассмотрим расположение частиц в слое на плоскости рисунок 6.

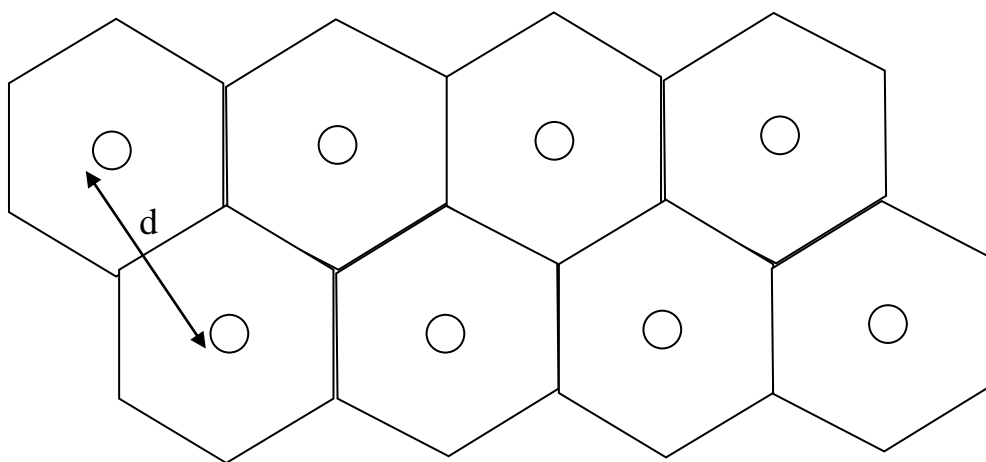


Рисунок 6 – Слой частиц в тетраэдральной эквидистантой сетке

Площадь слоя будет определяться как площадь шестигранника занимаемого одной частицей умноженной на количество частиц в слое. Площадь шестигранника определяются по формуле (8):

$$S = 6 \frac{d}{2} \frac{2d}{2\sqrt{3}} \frac{1}{2} = d^2 \frac{6}{4\sqrt{3}} = d^2 \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (8)$$

Из графика зависимости напряжения от деформации рисунок 4а нам известно давление. Рассмотрим два слоя для определения силы притяжения между слоями. Сила притяжения между двумя слоями определяются по формуле (9)

$$F_0 = PS \quad (9)$$

Зная силу притяжения между слоями, мы можем определить силу, с которой взаимодействуют два атома. Сила взаимодействия двух атомов по нормали определяется по формуле (10):

$$F_1 = \frac{F_0}{N} = \frac{PS}{N} = P \frac{d^2 \sqrt{3}}{2} \quad (10)$$

Сила, с которой частицы взаимодействуют, под углом определяется по формуле (11) с учетом того, что каждая частица в рассматриваемом слое связана с 3 атомами в другом слое.

$$F = \frac{F_1}{3 \cos \alpha} = \frac{F_1}{3} \sqrt{\frac{3}{2}} = Pd^2 \frac{1}{2\sqrt{2}} \quad (11)$$

По данным формулам была рассчитана сила притяжения и отталкивания для двух частиц на основе экспериментально полученных графиков растяжения рисунок 4а, рисунок 4б и графиков сжатия рисунок 5а, рисунок 5б для алюминия Д16Т. Сила взаимодействия между двумя частицами представлена на рисунке 7.

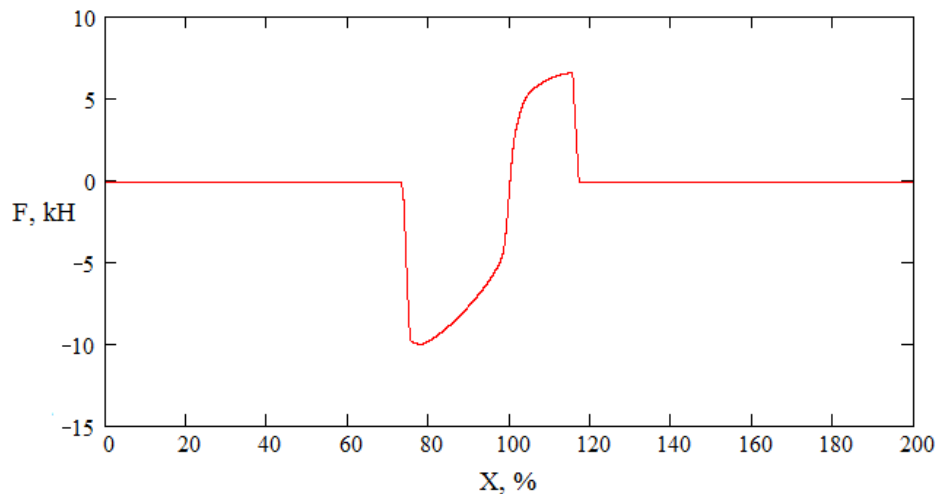


Рисунок 7 – График зависимости силы притяжения между частицами от расстояния

Таким образом, полученный на основе экспериментальных данных график зависимости силы притяжения от расстояния алюминиевого стержня длиной 20мм, практически идентичен силовому графику, используемому при численном моделировании рис. 2 в области от 95% до 110%.

## 2.4 Код ядра программы AcousticModel\_OpenCL

```
kernel void PointWaves ( // Объявление ядра PointWaves.  
const int Nr, // Объявление и инициализация константы типа int с именем Nr  
– число частиц.  
const int Nm, // Объявление и инициализация константы типа int с именем Nm  
– число материалов.  
const int Nd, // Объявление и инициализация константы типа int с именем Nd  
– расстояние.  
const int Ng, // Объявление и инициализация константы типа int с именем Ng  
– число групп.  
const int nt, // Объявление и инициализация константы типа int с именем nt –  
хранит координаты и скорости частиц.  
__global float* CRD, // Глобальная переменная доступная всем функциям,  
объявленным в данном файле CRD – массив, содержащий координаты и  
скорости частиц.  
__global char* MTR, // Объявление массива MTR – массив, содержащий тип  
материала каждой частицы.  
__global float* FRC, // Объявление массива FRC – массив, описывающий силу  
взаимодействия между частицами в зависимости от расстояний.  
__global float* SBI, // Объявление массива SBI – массив, описывающий  
импульсный сигнал.  
__global int* NBR, // Объявление массива NBR – массив, содержащий номер  
соседней частицы.  
const float d, // Период решетки.  
const float dt) // Шаг по времени.  
{  
Const int idr = get_global_id(0); // Переменная idr являющаяся константой =  
глобальному идентификатору процесса.
```

```

int   nx,ny,nz,nnx,nnx,nnz,n,nn,size,np,nnp,nr,mtr,mtrr,nF;      // Объявление
переменных типом int.

float   x,y,z,x0,y0,z0,xx,yy,zz,vx,vy,vz,r,F,Fx,Fy,Fz,nr_,kr,r1,d2,krf,d9;      //
Объявление переменных типом float.

ng=idr; // идентификатор частицы.
NN=Np/Ng; // число частиц внутри одной группы.
If (ng>=Ng) return; // условия проверки не выхода за пределы массива
Krf = Nd/(d*2.0); //Коэффициент пространственного масштаба для пересчёта
на дискретную сетку.
for (np=ng*NN;np<(ng+1)*NN;np++) // Цикл по номеру частицы
{
  if ((CRD[np*10+9]!=1)) // Если данное условие выполняется, то происходит
расчет координат и скоростей частиц.
  {
    x=CRD[np*10+3]; // Координата частицы x.
    y=CRD[np*10+4]; // Координата частицы y.
    z=CRD[np*10+5]; // Координата частицы z.
    vx=CRD[np*10+6]; // Скорость частиц вдоль оси x.
    vy=CRD[np*10+7]; // Скорость частицы вдоль оси y.
    vz=CRD[np*10+8]; // Скорость частицы вдоль оси z.
    mtr=MTR[np]; // Материал определяется из массива MTR.
    Fx=0;Fy=0;Fz=0; // Обнуляем силовое воздействие.
    for (nn=0; nn<12; nn++) // Производим опрос 12 - ти ближайших соседних
частиц.
    {
      nnp=NBR[np*12+nn]; // Текущий номер соседней частицы.
      mtrr=MTR[nnp]; // Материал соседней частицы.
      x0=CRD[nnp*10+3]+nnx*d; // Координаты соседней частицы.
      y0=CRD[nnp*10+4]+nny*d; // Координаты соседней частицы.
      z0=CRD[nnp*10+5]+nnz*d; // Координаты соседней частицы.

```

```

r=sqrt((x-x0)*(x-x0)+(y-y0)*(y-y0)+(z-z0)*(z-z0)); // Расстояние между
текущей частицей и соседней.
if (r>0) {r1=1/r; // Если расстояние больше нуля, то определяется как 1/r.
nr_=r*Nd*krf;// Вычисление численного расстояния между текущей частицей
и соседней.
if (nr_>Nd-2)nr_=Nd-2; // Проверка на условие не выхода за пределы массива.
nr=nr_; // Вычисление целочисленного расстояния между текущей частицей и
соседней.
kr=nr_-nr; // Коэффициент интерполяции.
nF=(mtr+mtrr*Nm)*Nd+nr+Nm; // Выбор силового графика для конкретного
сочетания материалов.
F=FRC[nF]*(1-kr)+FRC[nF+1]*kr; // Определение силы взаимодействия
между текущей частицей и соседней.
Fx=Fx-F*(x-x0)*r1; // Силовое воздействие вдоль оси x.
Fy=Fy-F*(y-y0)*r1; // Силовое воздействие вдоль оси y.
Fz=Fz-F*(z-z0)*r1;} // Силовое воздействие вдоль оси z.
}
}
}
Fx=Fx/FRC[mtr]; //Force devide by mass.
Fy=Fy/FRC[mtr]; //Force devide by mass.
Fz=Fz/FRC[mtr]; //Force devide by mass.
ktr=1 // Коэффициент трения.
Скорость частиц через промежуток времени dt с учетом коэффициента
трения.
vx=vx+(Fx-vx* ktr)* dt;
vy=vy+(Fy-vy* ktr)*dt;
vz=vz+(Fz-vz* ktr)*dt;
CRD [np*10+6]=vx; // Скорость частиц в массиве CRD.
CRD[np*10+7]=vy; // Скорость частиц в массиве CRD.

```

```

CRD[np*10+8]=vz; // Скорость частиц в массиве CRD.
x=x+vx*dt; // Определение координат частиц.
y=y+vy*dt; // Определение координат частиц.
z=z+vz*dt; // Определение координат частиц.
CRD[np*10+0]=x; // Определяем координату частицы в массиве CRD.
CRD[np*10+1]=y; // Определяем координату частицы в массиве CRD.
CRD[np*10+2]=z; // Определяем координату частицы в массиве CRD.
Скорость частиц через промежуток времени dt с учетом коэффициента
трения.
vx=vx+(Fx-vx*ktr)*dt;
vy=vy+(Fy-vy*ktr)*dt;
vz=vz+(Fz-vz*ktr)*dt;
    }
    if (CRD[np*10+9]==2)
    {
Внесение сигнала в модель.
CRD[np*10+0]= CRD[np*10+0]+SBI[nt*6+0];
CRD[np*10+1]= CRD[np*10+1]+SBI[nt*6+1];
CRD[np*10+2]= CRD[np*10+2]+SBI[nt*6+2];
CRD[np*10+6]= CRD[np*10+6]+SBI[nt*6+3];
CRD[np*10+7]= CRD[np*10+7]+SBI[nt*6+4];
CRD[np*10+8]= CRD[np*10+8]+SBI[nt*6+5];
    }
    }
}
";

```

## 2.5 Моделирование распространения акустической волны в среде при наличии рассеивающей неоднородности

С помощью разработанной программы `AcousticModel_OpenCL` производилось моделирование сферической акустической волны распространяющейся в среде при наличии неоднородности. Неоднородность представляет собой нарушение кристаллической структуры. Рассеивающий объект (неоднородность) представляет пластину под углом, а фоновая среда является эквивалентом латуни (скорость звука 4430 м/с, плотность 8485 кг/м<sup>3</sup>). При проведении численного эксперимента в области с размерами 128 мм на 55 мм.

В случае твердотельной среды, при распространении некоторого возмущения в среде будет распространяться уже два типа волн – продольные и поперечные. Это связано с тем, что в твердой среде, в отличие от жидкой, существует сдвиговая упругость. На рисунке 8 представлен результат моделирования волны, исходящей от частицы сверху. Красным обозначена скорость частицы по оси X, зелёным по оси Y, синим по оси Z. Начальное возмущение было направлено по оси X. Видно, что продольная волна опережает поперечную, наблюдается дифракция волн на неоднородности, отражение волн, согласно закону Снеллиуса (угол падения равен углу отражения).



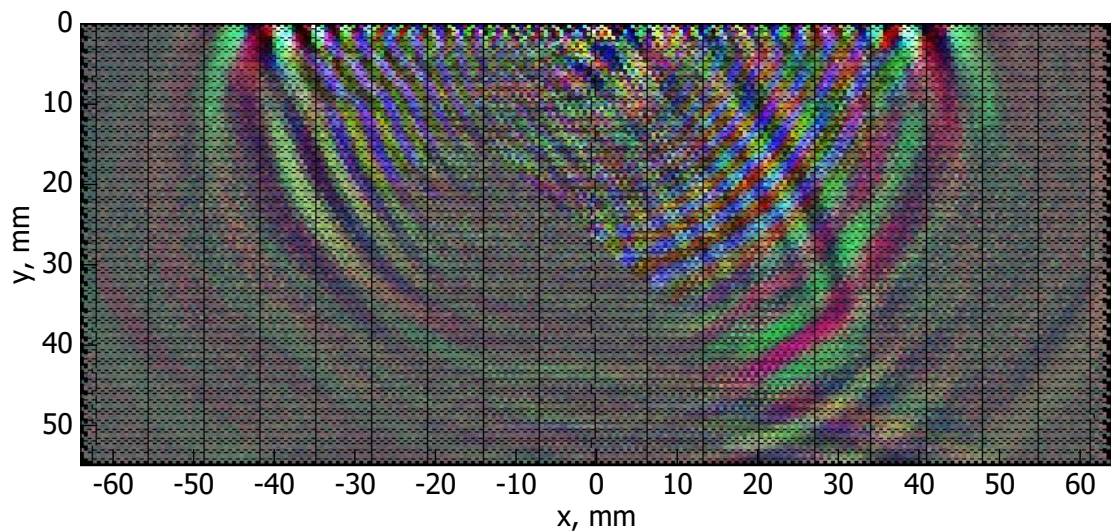


Рисунок 8 – Результат моделирования колебаний в решётке после возбуждения одной частицы монополярным импульсом

## 2.6 Расчет скорости распространения акустической волны в среде

Рассмотрим одномерную периодическую цепочку частиц. Пусть период этой цепочки равен  $d$ . Тогда в состоянии равновесия координата  $n$ -го атома цепочки равна  $x = nd$ .

При сдвиге частицы из состояния равновесия, в линейном приближении, появляется сила пропорциональная величине сдвига (закон Гука). Обозначим сдвиг  $n$ -той частицы из состояния равновесия величиной  $X_n$ . Следовательно сила действующая со стороны частицы слева может быть записана как  $F_1 = k(X_{n-1} - X_n)$ , а сила действующая со стороны правой частицы запишется как  $F_2 = k(X_{n+1} - X_n)$ . Для центральной частицы массой  $m$  можно записать уравнение Ньютона:

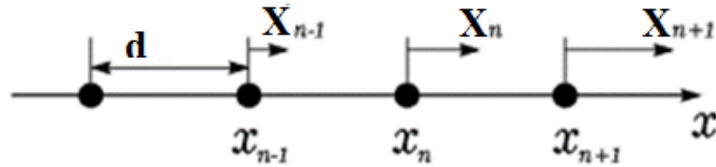


Рисунок 9 – Одномерная цепочка с одним атомом в элементарной ячейке

$$m \frac{\partial^2 X_n}{\partial t^2} = F_1 + F_2 = k(X_{n+1} - 2X_n + X_{n-1}) \quad (12)$$

Рассмотрим случай, когда шаг  $d$  много меньше характерного расстояния, на котором происходит существенное изменение отклонения частиц (или много меньше длины волны). Тогда величина  $(X_{n+1} - 2X_n + X_{n-1}) \approx d^2 \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$ ,

следовательно

$$m \frac{\partial^2 X_n}{\partial t^2} = kd^2 \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}, \text{ или } \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} - \frac{m}{kd^2} \frac{\partial^2 X_n}{\partial t^2} = 0 \quad (13)$$

– это является канонической формой записи для волнового уравнения, из которого следует, что скорость звука определяется выражением:  $\frac{1}{c^2} = \frac{m}{kd^2}$ , следовательно, скорость звука.

$$c = d \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (14)$$

## 2.7 Решение обратной задачи на основе численного моделирования в программе AcousticModel\_OpenCL

Решение обратной задачи основано на методе обратного распространения волн. Метод обратного распространения волн основан на том же процессе численного моделирования, что и прямая задача, но здесь шаг по времени принимается отрицательным. Вместе с этим, точки приёма становятся излучателями, причём они излучают именно тот сигнал, который был принят в соответствующий момент времени. Чем плотнее приёмники будут заполнять всё пространство, тем точнее будет возможно восстановление

полного исходного состояния системы в прошлые моменты времени. Так будет возможно восстановить причину появления рассеянного поля.

В нашем случае, приёмники располагаются сверху, поэтому волна обратного распространения будет проходить сверху вниз. В точке, где находится точечный рассеиватель, волна обратного распространения сходится в точку (с областью локализации порядка длины импульса). Если продолжить обратный ход времени, уже сфокусированное в точке рассеяния поле начнёт расходиться. Заранее неизвестно в какой момент времени необходимо остановить обратное распространение, поэтому мы не можем точно гарантировать восстановление рассеивателя.

Остановить обратное распространение имеет смысл именно в тот момент времени, когда до рассматриваемой точки пространства доходила волна прямого распространения. На основе метода обратного распространения волн проводилось численное моделирование по восстановлению точечного источника в среде.

В результате численного моделирования на основе метода обратного распространения волн было восстановлено изображение точечного рассеивателя представленное на рисунке 10.

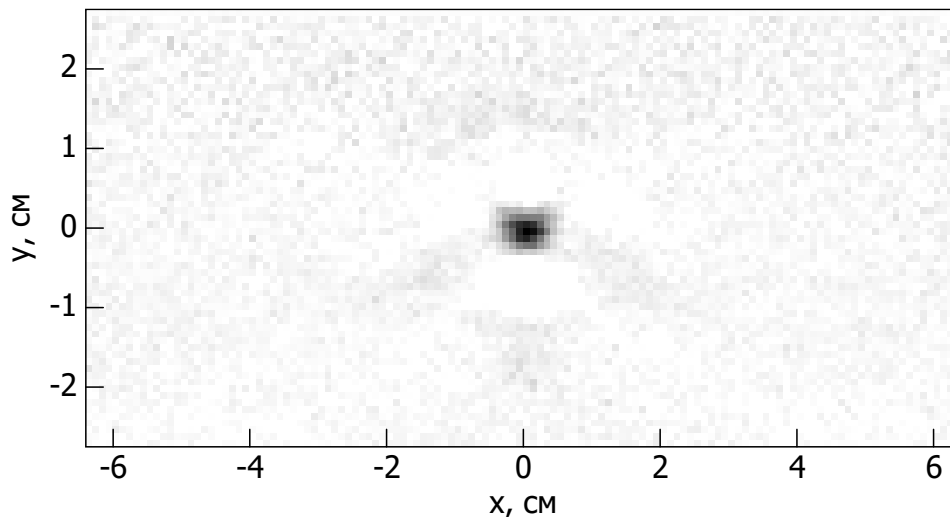


Рисунок 10 – Восстановленное изображение точечного  
Рассеивателя

## 2.8 Восстановление изображения рассеивающей неоднородности в среде.

С помощью разработанной программы `AcousticModel_OpenCL` проводилось восстановление изображения рассеивающей неоднородности в среде [58, 59]. Рассеивающий объект (неоднородность) имеет вид представленный на рисунке 12, а фоновая среда является эквивалентом латуни (скорость звука 4430 м/с, плотность 8485 кг/м<sup>3</sup>).

Неоднородностью, в данном случае является нарушение кристаллической решётки, через которую не проходят акустические волны. Рассматриваем источник акустического сигнала в виде плоской волны излучаемой в прямом направлении оси  $Z$ . Форма исходного сигнала – монополярный импульс в форме кривой Гаусса длительностью 2,4 мкс (по уровню половинной амплитуды).

Плоская волна, распространяясь вниз в среде, сталкивается с рассеивающей неоднородностью, дифрагирует и отражается. Часть рассеянного поля попадает в приемные датчики, в которых измеряется скорость частиц и их отклонение в кристаллической решётке в зависимости

от времени. Приёмные датчики располагаются на плоскости  $Z = 0$  с шагом равным шагу размещения частиц.

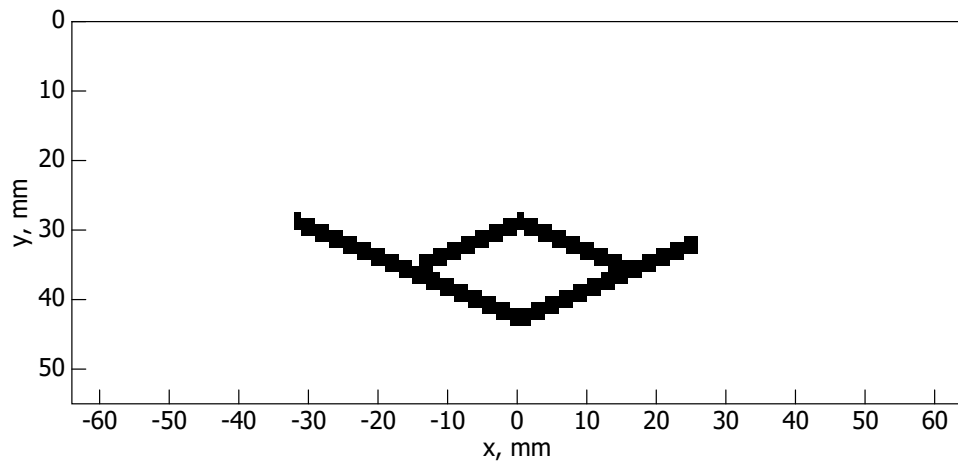


Рисунок 11 – Изображение тестовой неоднородности

На рисунке 12 представлено изображение поля волны рассеянного на рассматриваемой неоднородности. Можно наблюдать отражение акустического импульса плоской волны от неоднородности. Падающая волна не проходит через верхнюю часть неоднородности, а полностью отражается, следовательно, нижняя часть неоднородности не будет рассеивать поле и не будет обнаружена. Всё рассеянное поле в сторону плоскости  $y=0$  регистрируется, а именно вектора скорости и координаты верхних частиц.

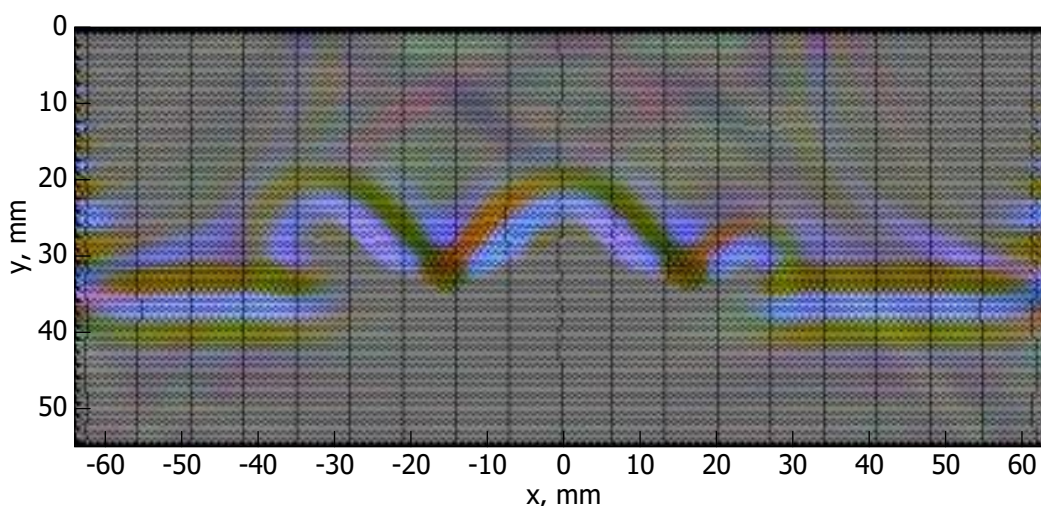


Рисунок 12 – Решение прямой задачи в определённый момент времени

Восстановления изображения рассеивающих неоднородностей производится на основе комбинирования решения задач численного моделирования акустических процессов с положительным ходом времени и с отрицательным ходом времени. Изначально предполагаем, что среда однородна и не содержит рассеивателей, и моделируем в ней распространение плоской волны от источника. Далее моделируем обратное распространение волн от приёмников, обращая время. Умножаем скалярно скорости частиц из двух моделей в совпадающие моменты времени. В области нахождения рассеивателей, прямые и обратные волны перекрываются, что при их наложении (путём скалярного умножения скоростей частиц), позволяет визуализировать рассеивающий объект. Поскольку волна не проникает в саму неоднородность, представляющую собой нарушение кристаллической решётки, поле рассеяния максимально над неоднородностью, и мы визуализируем скорее контур этой неоднородности.

На рисунке 13 представлен результат моделирования плоской волны при обратном распространении поля. Красным обозначена скорость частицы по

оси  $X$ , зелёным по оси  $Y$ , синим по оси  $Z$ . Начальное возмущение было направлено по оси  $Z$ . Видно, что в области, где находится тестовая неоднородность происходит фокусировка рассеянного от объекта поля.

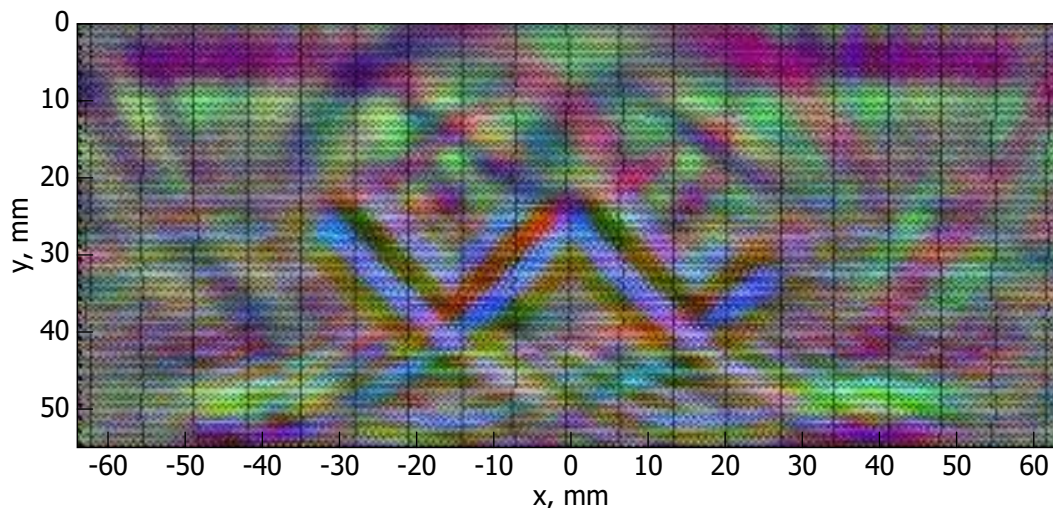


Рисунок 13 – Обратное распространение поля

На рисунке 14 представлено восстановленное изображение тестовой неоднородности. По восстановленному результату можно определить форму объекта. Предложенный метод восстановления изображения позволяет учитывать эффект дифракции. Следует отметить, что вогнутые области и внутренние пустоты объектов не будут визуализированы, поскольку в эти области волновое поле не проникает.

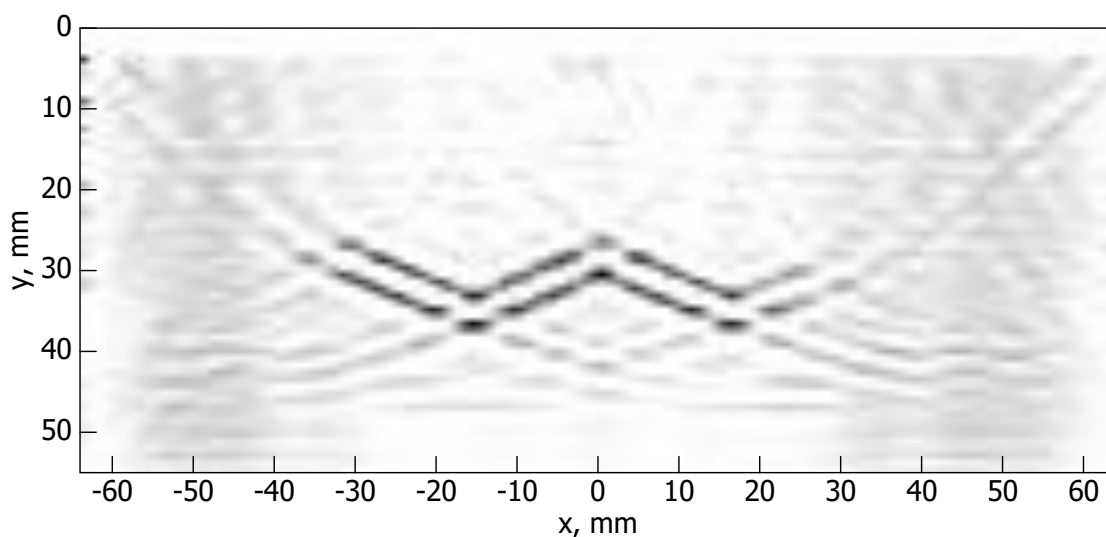


Рисунок 14 – Восстановленное изображение неоднородностей

Для проверки возможности визуализации объектов более сложных форм, было проведено моделирование рассеивателя в виде окружности рисунок 15.

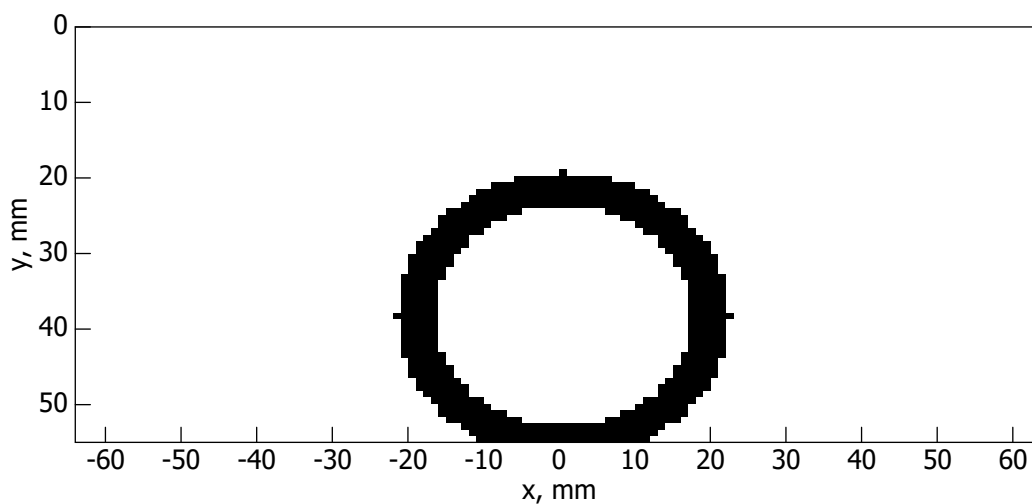


Рисунок 15 – Изображение моделируемой неоднородности

В результате решения обратной задачи предложенным методом, было восстановлено изображение рассеивателя, представленное на рисунке 16. Можно видеть, что только верхняя часть окружности визуализирована. Это



связано с тем, что большая часть волн рассеянных на объекте не возвращается в сторону приёмников. Таким образом, объекты не любой формы могут быть визуализированы, необходимо наличие волн рассеянных в сторону приёмников.

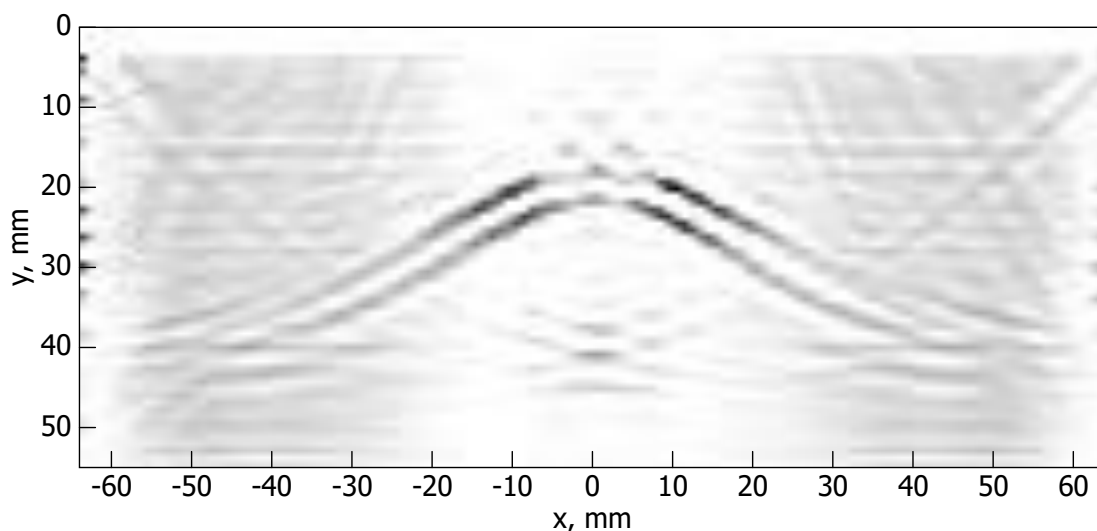


Рисунок 16 – Восстановленное изображение неоднородностей

### 2.9 Численное моделирование ультразвуковых волноводов

Кроме этого было проведено численное моделирование структуры составленной из трёх различных твёрдых сред [60]. Данная структура является ультразвуковым волноводом из титана соединённым с пьезоэлементом и отражателем из стали. Для задания материалов с различными свойствами регулировались значения массы частиц и угол наклона кривой зависимости силы от расстояния вблизи точки равновесия.

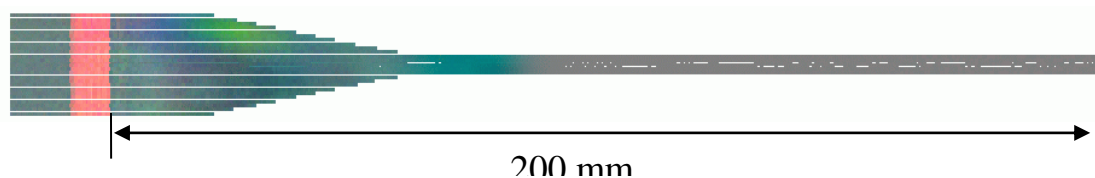


Рисунок 17 – Модель ультразвукового волновода

В данном случае пьезоэлемент является источником колебаний и весь его объём подвержен внешнему возмущающему воздействию. Модель обеспечивает дополнительное сжатие и растяжение пьезоэлемента в зависимости от времени, но при этом он взаимодействует с другими материалами и проводит звук.

В результате численного моделирования были получены значения резонансных частот для данной структуры.

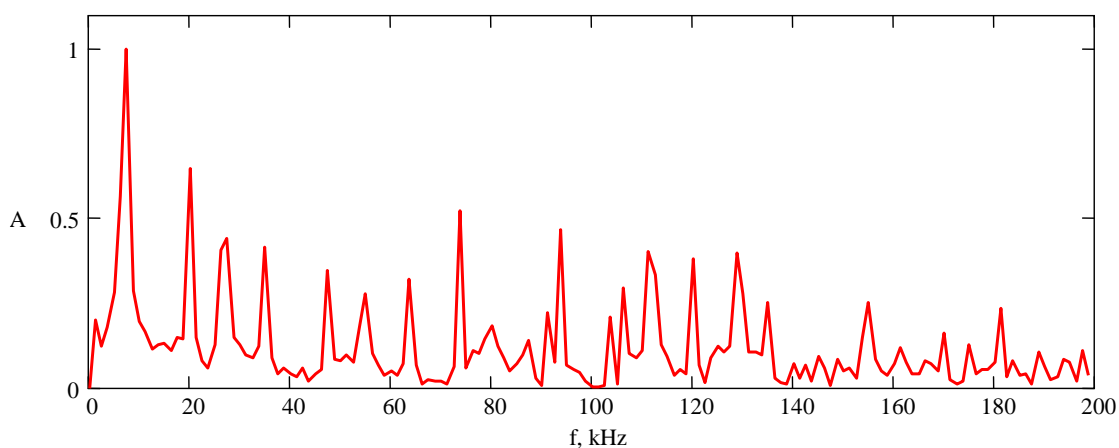


Рисунок 18 – Спектр импульсного сигнала на конце волновода

На частоте 20 кГц амплитуда колебаний волновода ведёт себя как представлено на рисунке 19. Можно видеть, что при совпадении возбуждающей частоты с резонансной происходит почти линейное нарастание амплитуды вибраций на конце волновода.

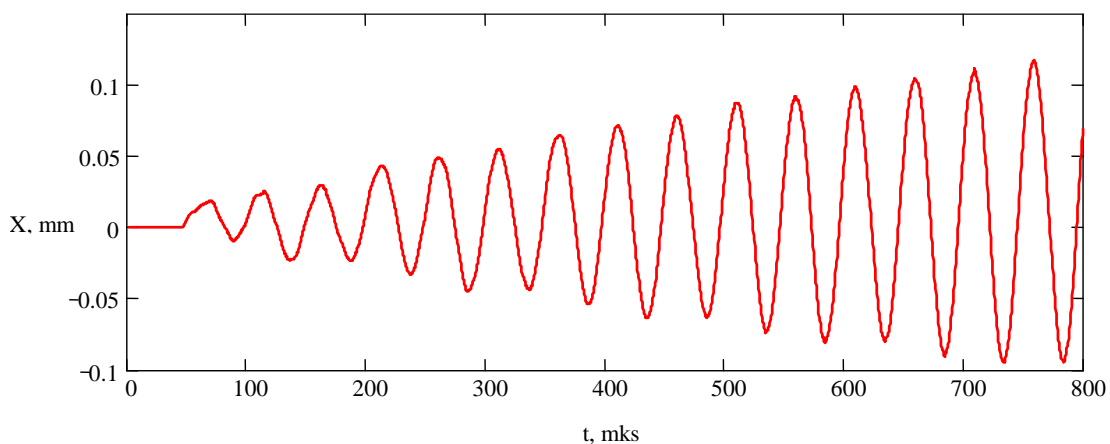


Рисунок 19 – Гармонический сигнал на частоте 20 кГц  
на конце волновода

Из приведённых примеров численного моделирования, можно наблюдать ряд акустических эффектов: дифракция, отражение, интерференция. В линейном приближении данная модель сводится к волновому уравнению.

Особенностью модели является то, что она позволяет значительно сократить время расчета за счет уменьшения количества опрашиваемых частиц. Модель позволяет учитывать нелинейные эффекты в среде, путём задания графика зависимости сил. В результате работы создана компьютерная модель, позволяющая рассчитать процесс распространения акустической волны в твердом теле при наличии неоднородности.

Возможно предсказание эффектов дифракции и отражения волн от объекта произвольной формы, а также на основе временного обращения волн восстановить неоднородность в среде по отраженному полю.

### 3 Экспериментальные исследования

Для проверки метода решения прямой и обратной задачи, в разработанной программе AcousticModel\_OpenCL. Были проведены эксперименты в воде по визуализации точечных источников и получения томографического изображения рассеивающего объекта.

#### 3.1 Визуализация источников акустических волн в воде

Для визуализации источников акустических волн в воде, в качестве экспериментальной установки использовался двухкоординатный сканер, на котором закреплялся приемник рисунок 20.

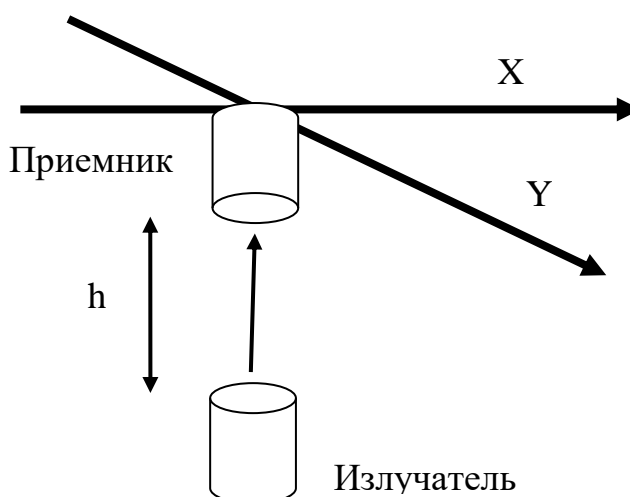


Рисунок 20 – Схема измерений

Источник акустических волн погружался в ванну с водой над поверхностью, которой перемещается сканер с закрепленным приемником и погруженным в воду, сигнал, испущенный источником, регистрируется приемником.

### 3.1.1 Визуализация одиночного излучателя

Для проверки возможности визуализации точечного излучателя в воде использовалась схема измерений представленная на рисунке 20. Которая представляет собой двухкоординатный сканер, расположенный в горизонтальной плоскости. Пьезокерамический излучатель диаметром 18 мм и с резонансной частотой 40 кГц погружался в воду на глубину 55мм, и излучал звук. Пьезокерамический приемник диаметром 10 мм и с резонансной частотой 40 кГц был закреплен на сканере и погружен в воду. Форма исходного сигнала имеет вид представленный на рисунке 21.

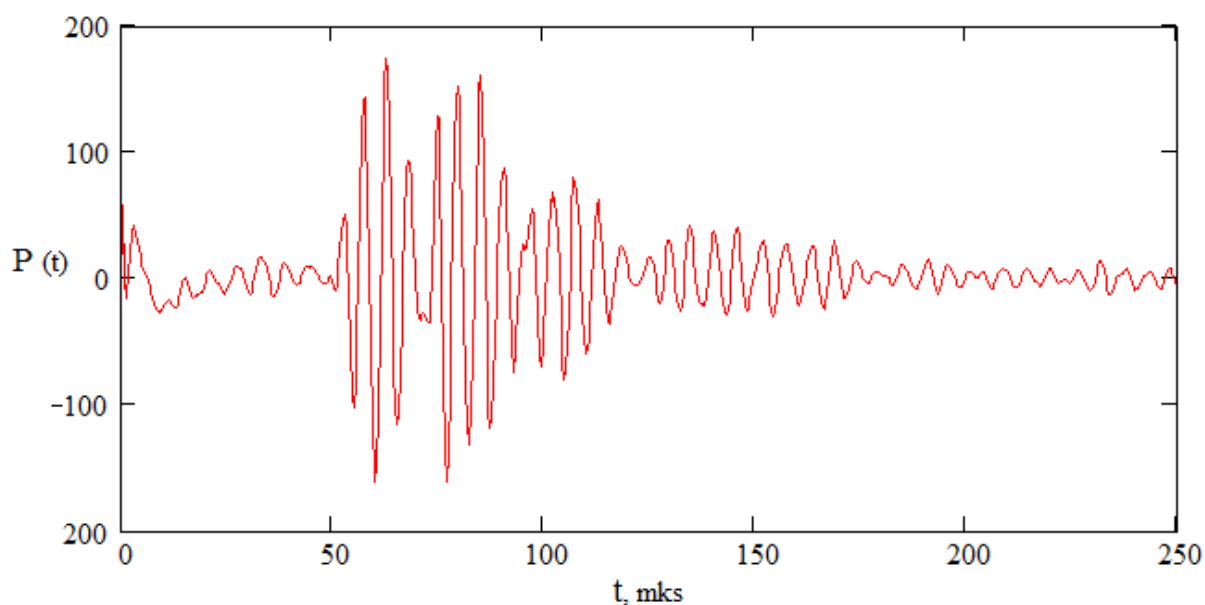


Рисунок 21 – Форма исходного сигнала

Измерения проводились в области с размерами 128X128мм. Регистрация поля излучателя проводилась с помощью программы WaterScanStep. Измеренные данные вносились в разработанную программу AcousticModel\_OpenCL, в которой проводилось моделирование восстановления точечного источника на основе метода обратного

распространения волн. На рисунке 22 представлен результат восстановления точечного излучателя на основе экспериментальных данных.

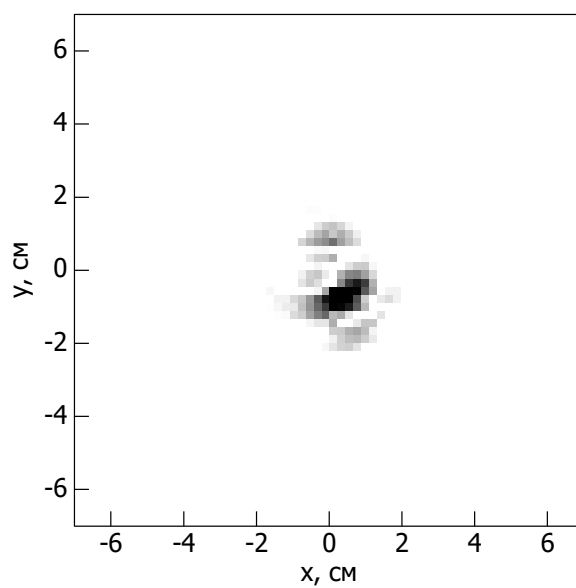


Рисунок 22 – Восстановленное изображения точечного излучателя (вид сверху)

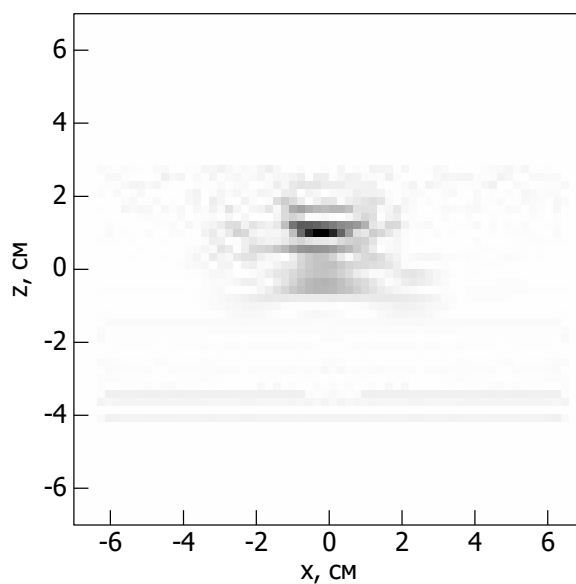


Рисунок 23 – Восстановленное изображения точечного излучателя (вид сбоку)

### 3.1.2 Визуализация двух точечных излучателей

Для проверки возможности визуализации двух точечных излучателей в воде использовалась схема измерений представленная на рисунке 24.

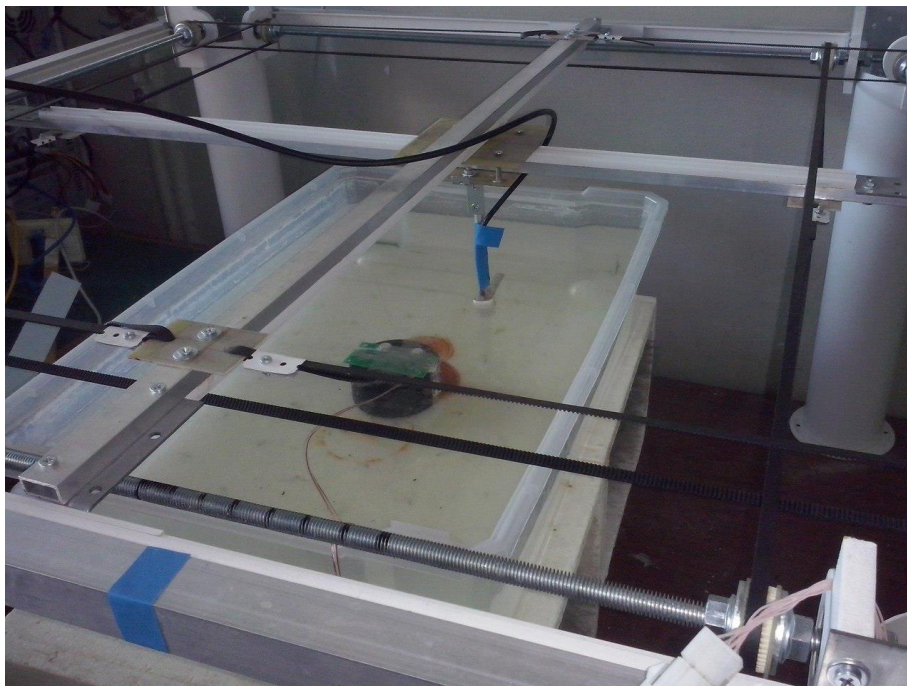


Рисунок 24 – Схема измерений для двух точечных излучателей

Которая представляет собой двухкоординатный сканер, расположенный в горизонтальной плоскости. Два одинаковых герметизированных пьезокерамических излучателя с резонансной частотой 40 кГц с расстоянием между ними 33 мм были размещены на пластине, представленной на рисунке 25.

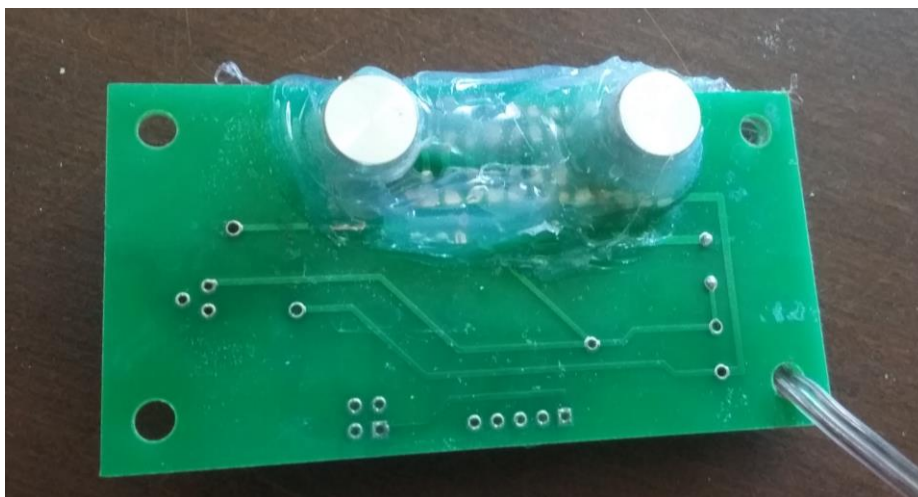


Рисунок 25 – Два герметизированных пьезокерамических излучателя с резонансной частотой 40 кГц с расстоянием между ними 33 мм

Излучатели погружались в воду на глубину 55мм, и излучали звук. Приемник был закреплен на сканере и погружен в воду. Форма исходного сигнала имеет вид представленный на рисунке 21. Измерения проводились в области с размерами 128X128мм. Регистрация поля излучателя проводилась с помощью программы WaterScanStep. Измеренные данные вносились в разработанную программу AcousticModel\_OpenCL, в которой проводилось моделирование восстановления двух точечных излучателей на основе метода обратного распространения волн. На рисунке 26 представлен результат восстановления двух точечных излучателей на основе экспериментальных данных.



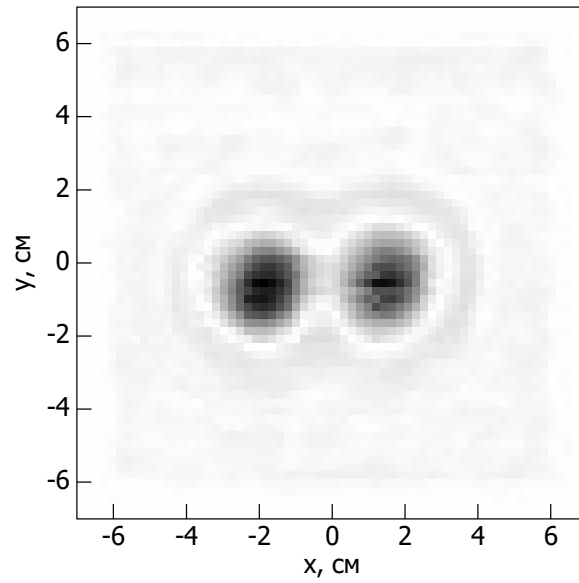


Рисунок 26 – Восстановленное изображение двух точечных излучателей  
(вид сверху)

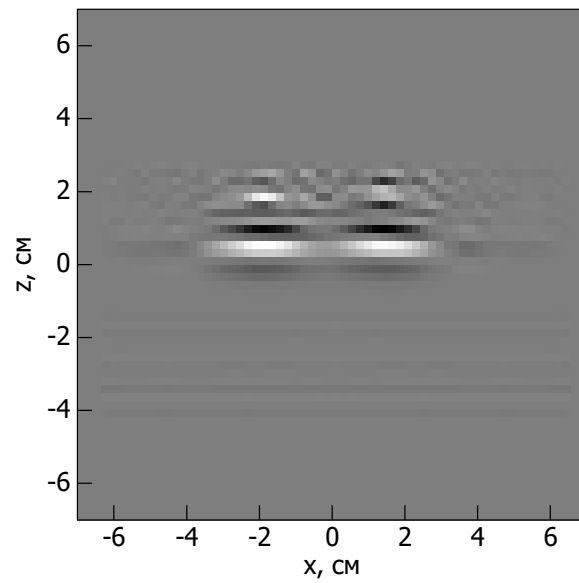


Рисунок 27 – Восстановленное изображение двух точечных излучателей  
(вид сбоку)

### 3.2 Восстановление изображения рассеивающего объекта

С помощью разработанной программы AcousticModel\_OpenCL проводилась проверка возможности получения томографического изображения рассеивающей неоднородности. Использовалась схема измерений представленная на рисунке 28.

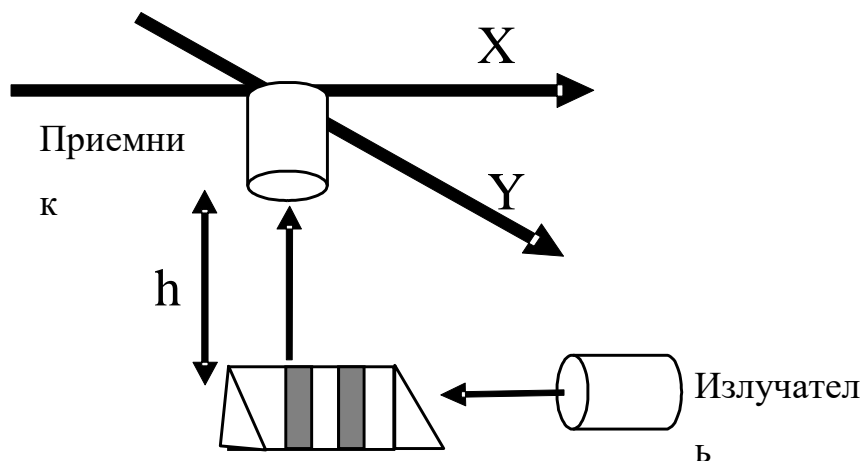


Рисунок 28 – Схема измерений

Которая представляет собой двухкоординатный сканер, расположенный в горизонтальной плоскости. Приемник крепится на сканере и перемещается в исследуемой области, над рассеивающей неоднородностью. Рассеивающая неоднородность погружается в ванну с водой. Излучатель крепится на некотором расстоянии от объекта. Сигнал, испущенный излучателем, распространяется в воде дойдя, до неоднородности, рассеивается на ней и отражается. Часть отраженного сигнала регистрируется приемником, перемещающемся на двухкоординатном сканере над исследуемой областью.

### 3.2.1 Визуализация наклонной пластины

Для проверки возможности получения томографического изображения рассеивающего объекта в воде использовалась схема измерений представленная на рисунке 29.

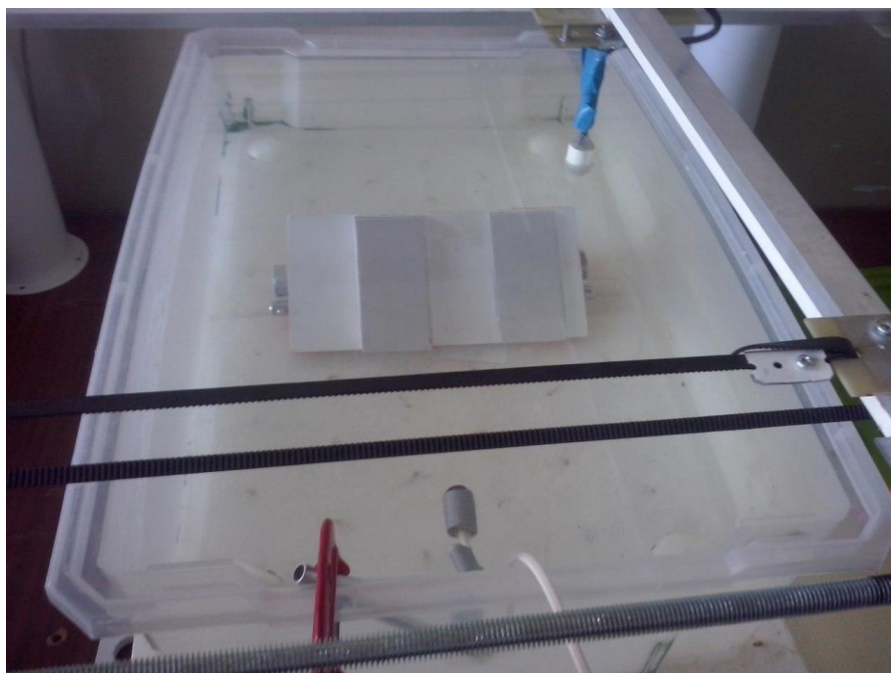


Рисунок 29 – Экспериментальная установка

Которая представляет собой двухкоординатный сканер, расположенный в горизонтальной плоскости. В качестве рассеивающей неоднородности использовалась ступенчатая наклонная пластина представленная на рисунке 30.

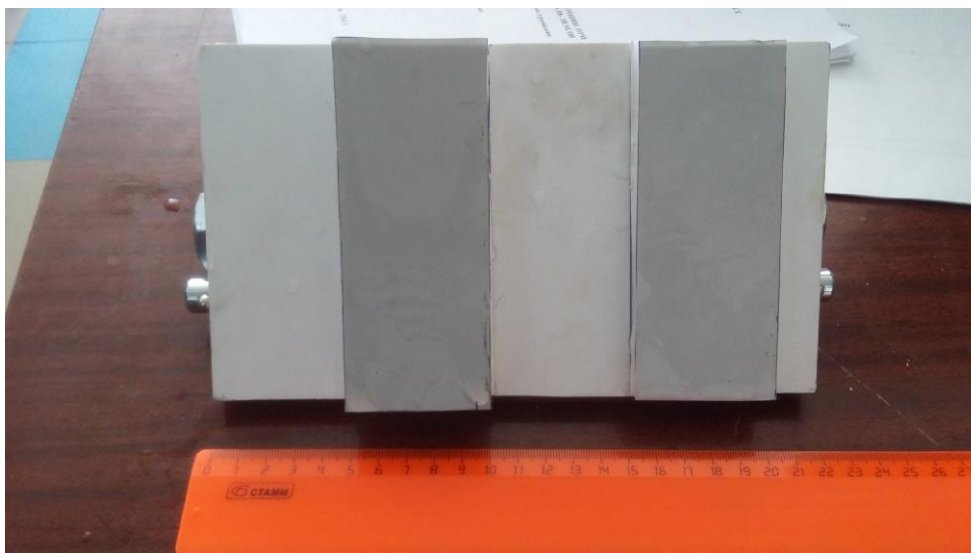


Рисунок 30 – Ступенчатая наклонная пластина

Излучатель погружался в воду на глубину 25мм, и крепился по центру боковой стенки ванны с водой и излучал звук. Приемник был закреплен на сканере и погружен в воду. Исходный сигнал имеет вид представленный на рисунке 21. Исходный сигнал был отфильтрован с помощью согласованной фильтрации. Измеренный сигнал представляет линейную комбинацию.

$$S_1(t) = \int_0^{\infty} S_0(t' - t)g(t')dt' \quad (15)$$

где  $S_1(t)$  - измеренный сигнал а  $S_0(t)$  - исходный (эталонный сигнал). Далее берем Фурье преобразование от измеренного и эталонного сигнала.

$$\tilde{S}_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(t)e^{i\omega t} dt \quad (16)$$

$$\tilde{S}_0(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_0(t)e^{i\omega t} dt \quad (17)$$

Зная, теорему о свертке формула 18

$$\tilde{S}_1(\omega) = S_0(\omega)\tilde{g}(\omega) \quad (18)$$

найдем  $\tilde{g}(\omega)$  из теоремы свертки

$$\tilde{g}(\omega) = \frac{\tilde{S}_1(\omega)}{\tilde{S}_0(\omega)} \rightarrow \frac{\tilde{S}_1(\omega)\tilde{S}_0^*(\omega)}{\tilde{S}_0(\omega)\tilde{S}_0(\omega) + \alpha} \quad (19)$$

где  $\alpha$  - коэффициент регуляризации. Используя обратное преобразование Фурье, получим отфильтрованный сигнал  $g(t)$

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{g}(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (20)$$

Сигнал, излучаемый точечным источником после фильтрации, имел вид представленный на рисунке 31.

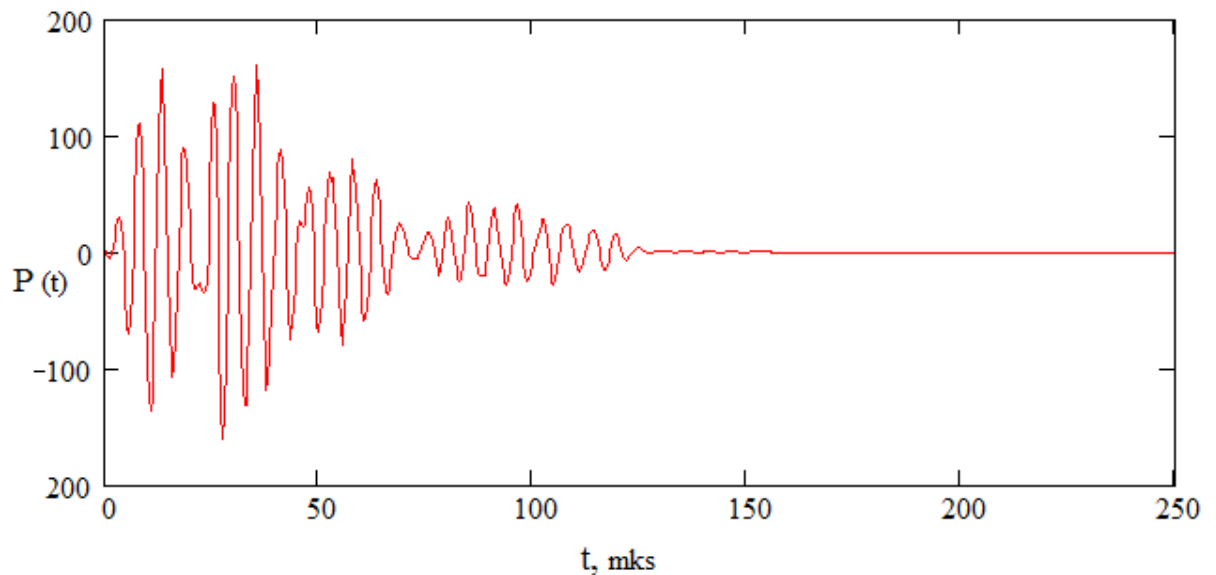


Рисунок 31 – Отфильтрованный сигнал

Измерения проводились в области с размерами 256X256мм. Регистрация поля отраженного от рассеивающей неоднородности проводилась с помощью программы WaterScanStep. Измеренные данные вносились в разработанную программу AcousticModel\_OpenCL, в которой проводилось моделирование восстановления томографического изображения рассеивающей неоднородности на основе комбинирования положительного и отрицательного хода времени, что путем скалярного умножения скоростей частиц в совпадающие моменты времени позволяет визуализировать рассеивающую неоднородность.

На рисунке 32 представлен результат восстановления рассеивающей неоднородности на основе экспериментальных данных для исходного сигнала представленного на рисунке 21.

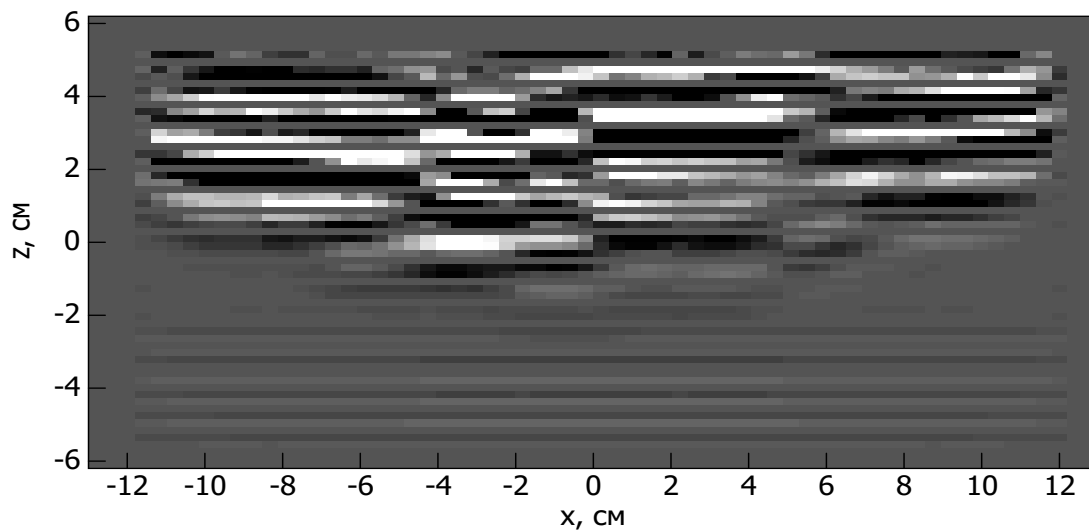


Рисунок 32 – Восстановленное изображение рассеивающей неоднородности

На рисунке 33 представлен результат восстановления рассеивающей неоднородности на основе экспериментальных данных для отфильтрованного сигнала.

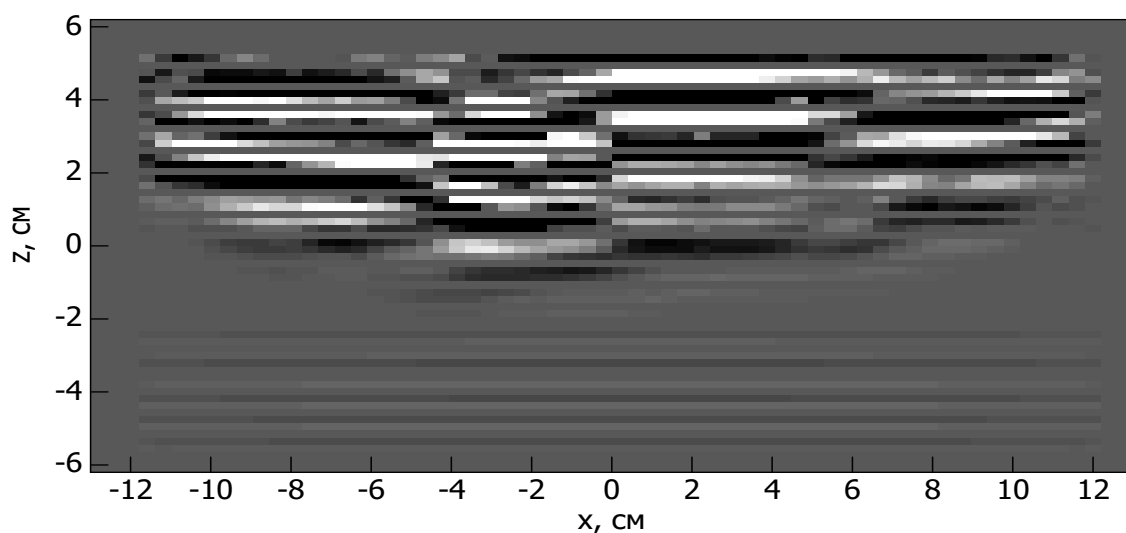


Рисунок 33 – Восстановленное изображения рассеивающей неоднородности отфильтрованным сигналом

В результате проведенных экспериментов была проверена возможность восстановления точечных излучателей и рассеивающих неоднородностей в среде, с помощью разработанной программы AcousticModel\_OpenCL. Было восстановлено изображения одного и двух точечных излучателей на основе метода обратного распространения волн.

В результате эксперимента по восстановлению рассеивающей неоднородности было получено томографическое изображения наклонной ступенчатой пластины на основе метода скалярного умножения скоростей частиц. Таким образом, подтверждается возможность решения прямых и обратных задач с помощью разработанной программы, а также работоспособность предложенного метода получения томографического изображения рассеивающей неоднородности на основе скалярного умножения скоростей частиц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения выпускной квалификационной работы проведен обзор литературы по теме диссертации. На основе проведенного анализа определены пути разработки методов решения прямых и обратных задач акустической томографии.

Предложен метод численного моделирования акустических процессов в тетраэдральной эквидистантной сетке на основе массива частиц и уравнения движения Ньютона.

Предложен метод решения обратной задачи для восстановления источников и рассеивающих неоднородностей в среде. Проведенное численное моделирование показало возможность восстановления томографического изображения рассеивающей неоднородности и точечных источников в среде.

Разработана программа для численного моделирования акустических процессов AcousticModel\_OpenCL. Данная программа предназначена для решения прямых и обратных задач и позволяет:

- а) Осуществлять обращение волн с фокусировкой в пространстве.
- б) Учитывать фоновые неоднородности среды.
- с) Восстанавливать неоднородности произвольной формы в среде.

Проведена экспериментальная проверка разработанного метода решения обратных задач, что подтверждает работоспособность предложенного метода.

Автор ВКР выражает свою искреннюю благодарность научному руководителю за оказанную им помощь в выполнении работы. И всему коллективу кафедры радиофизики ТГУ за внимание и полезные советы в ходе исследования.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Миронов. С. Б. Новые технологии ультразвукового изображения в диагностике узловых образований щитовидной железы. // Сибирский онкологический журнал. 2007. С. 70-71.
- 2 Малихова. О. А. Эндоскопическое ультразвуковое исследование в диагностике лимфом желудка. / О. А. Малихова, Б. К. Поддубный, И.В. Поддубная // Вестник РОНЦ им. Н. Н. Блохина РАМН. 2007. № 3. Т. 18. С. 56-60.
- 3 Стробыкин. Д. С. Исследование возможностей мониторинга течений методом встречного акустического зондирования в условиях очень мелкого моря. // Вестник ДВО РАН. 2005. № 2. С. 138 -145.
- 4 Буров. В. А. Возможность восстановления сезонной изменчивости мирового океана методами акустической томографии. / В. А. Буров, С. Н. Сергеев, А. А. Шмелев // Акустический журнал. 2007. № 3. Т. 53. С. 302 – 312.
- 5 Павлов. С. В. Ультразвуковой метод обнаружения негерметичных тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. // Дефектоскопия. 2011. № 5. С. 23 - 38.
- 6 Косицын. Н. В. Обнаружение дефектов на поверхности материалов из алюминиевых сплавов методом сфокусированного акустического пучка. / Н. В. Косицын, В. В. Петров // Вестник ТГТУ. 2005. № 1. Т. 21. С. 191 – 196.
- 7 Porter. R. P. Holography and the inverse source problem. / R. P. Porter, A. J. Devaney // J. Opt. Soc. Am. 1982. № 3. V. 72. P. 327 - 330.
- 8 Porter. P. Generalization holography and computational solutions to inverse source problem / P. Porter, A. J. Devaney // J. Opt. Soc. Am. 1982. № 12. V. 72. P.1707 - 1713.
- 9 Devaney. A. J. Inverse source and scattering problems in ultrasonics // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. 1983. № 6. V. SU-30. P. 355 - 364.

- 10 Буров. В. А. Обратные задачи рассеяния в акустике. / В. А. Буров, А. А. Горюнов, А. В. Сасковец, Т. А. Тихонова // Акустический журнал. 1986. В. 4. Т. 32. С. 433 - 449.
- 11 Горюнов. А. А. Обратные задачи рассеяния в акустике / А. А. Горюнов, А. В. Сасковец // М.: Изд-во МГУ. 1989. С. 152.
- 12 Johnson. S. A. Wave equation and inverse solution for soft tissue. // S. A. Johnson, G. Stenger, C. Wilcox, J. Ball, M. Berggren // Acoust. Imaging. 1982. V. 11. P. 409 - 423.
- 13 Лееус. М. Обратная задача дифракции. // Зарубежная электроника. 1970. № 2. С. 100-112.
- 14 Bojarsky. N. N. A survey of the physical optics inverse scattering identity // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1982. № 5. V. AP – 30. P. 980 - 989.
- 15 Kogan. V. G. On Born approximation for weak uniform scatterers. / V. G. Kogan, E. F. Lopes // Inverse Problems. 1985. V. 1. P. 331 - 338.
- 16 Kliman. R. E. On the condition number of integral equations in acoustics using modified fundamental solutions. / R. E. Kliman, R. Kress // IMA J. Appl. Math. 1983. V .31. P. 79 - 90.
- 17 Devaney. A. J. A filtered propagation algorithm for diffraction tomography // Ultrason. Imag. 1982. V. ВМЕ – 30. P. 337 - 386.
- 18 Суханов. Д. Я. Трансмиссионное некогерентное ультразвуковое видение плоских объектов. / Д. Я. Суханов, К. В. Барышева // Акустический журнал. 2010. № 4. Т. 56. С. 491 – 496.
- 19 Суханов. Д. Я. Монохроматическая ультразвуковая трансмиссионная томография. / Д. Я. Суханов, А. А. Муравьева. // Автометрия. 2015. № 3. Т. 53. С. 42 – 49.
- 20 Бархатов. В. А. Решение волновых уравнений методом КРВО. Двумерная задача. Основные соотношения. // Дефектоскопия. 2007. № 9. С. 54-70.

21 Сухоручкин. Д. А. Труды школы-семинара «Волны-2016». Акустика неоднородных сред. / Д. А. Сухоручкин, О. А. Сапожников // 2016. С. 22 – 26.

22 Суханов. Д. Я. Бистатическая многопозиционная волновая томография. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. № 1. Т. 58. С. 24 – 30.

23 Суханов. Д. Я. Восстановления изображений звукоизлучающих объектов по многопозиционным широкополосным дистанционным измерениям звукового поля. / Д. Я. Суханов. Н. Н. Ерзакова // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. № 8/2. Т. 56. С. 57 – 61.

24 Stolt R. H. Migration by Fourier transform. // Geophysics. 1978. № 1 V. 43. P. 23 - 48.

25 Якубов. В. П. Радиотомография по сверхширокополосным моностатическим измерениям на неплоской поверхности. / В. П. Якубов, Д. Я. Суханов, А. В. Клоков // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. № 9. Т. 56. С. 20 – 25.

26 Бархатов. В. А. Решение динамических задач акустики методом конечных разностей во временной области. Основные соотношения. Анализ погрешностей. // Дефектоскопия. 2005. № 3. С. 12 - 26.

27 Бархатов. В. А. Решение волновых уравнений методом конечных разностей во временной области. Двумерная задача. Основные соотношения. // Дефектоскопия. 2007. № 9. С. 54-70.

28 Авдеев. Д. А. Трехмерное моделирование акустического поля методом конечных разностей во временной области. / Д. А. Авдеев, В. И. Римлянд // Вестник ТОГУ. 2016.

29 Домбровская. Ж. О. Метод конечных разностей во временной области для кусочно-однородных диэлектрических сред. Моделирование и анализ информационных систем. 2016. № 5. Т. 23. С. 539–547

30 Толстогузова. В. Л. Оценка погрешности результатов численного решения уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной

области. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Приборостроение" 2004. В. 2 Т. 55.

31 Югов. Н. Т. Алгоритм расчета контактных границ в методе конечных элементов для решения задач высокоскоростного соударения деформируемых твердых тел. / Н. Т. Югов, Н.Н. Белов // Вычислительные технологии. 1998. № 3. Т. 3. С. 94 – 102.

32 Игнатъев. А. В. Алгоритм расчета стержневых систем по методу конечных элементов в смешанной форме. // Вестник гражданских инженеров 2007. № 2. Т. 11. С. 87.

33 Корчагин. П. В. Выбор сетки в методе конечных элементов для расчета потока вещества через границу при решении задач переноса. // Известия вузов. Естественные науки 2004. № 2. С. 72 – 74.

34 Ларин. А. В. Исследование методов реализации неравномерной сетки для моделирования плазмы методом частиц в ячейках. / А. В. Ларин, Е. С. Ефименко // Суперкомпьютерные дни в России. 2016. С. 831 – 832.

35 Месяц Е. А. О выборе числа частиц в методе частиц в ячейках для моделирования задач физики плазмы. / Е. А. Месяц, К.В. Лотов // Вычислительные технологии. 2013. № 6. Т. 18. С. 83 – 96.

36 Киреев С. Е. Параллельная реализация метода частиц в ячейках для моделирования задач гравитационной космодинамики. // Автометрия. 2006. № 3. Т. 42. С. 32 – 39.

37 Метод функции Грина. URL: [http://stu.alnam.ru/book\\_clel-72](http://stu.alnam.ru/book_clel-72). ( Дата обращения 15.11. 2018)

38 Тихонов А. Н. Самарский. А. А. Уравнения математической физики. // М.: Наука. 1977.

39 Владимиров В. С. Уравнения математической физики. М.: Физматлит. 2004.

40 Kaveh. M. A comparison of Born and Rytov approximation in acoustic tomography. / M. Kaveh, M. Soumekh, R. K Mueller // Acoust. Imag. 1982 V. 11. P. 325-335.

41 Kaveh. M. Further results on diffraction tomography using Rytov's approximations. / M. Kaveh, M. Soumekh, R. K. Mueller // *Acoust. Imag.* 1982. V.12. P. 273 - 280.

42 Kaveh. M. Algorithm and experimental results in acoustic tomography using Rytov's approximations. // M. Kaveh, M. Soumekh, R. K. Mueller ICASSP 83 Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech and Signal Process. Boston. 1983. V.1. P. 135 - 138.

43 Евстигнеев. Р. О. Обратная задача определения параметров неоднородности тела по измерениям акустического поля. / Р. О. Евстигнеев, М. Ю. Медведик, Ю. Г. Смирнов // *Журнал вычислительной математики и математической физики.* 2016. № 3. Т. 56. С. 490 – 497.

44 Баканов. Г. Б. Итерационный метод определения границы неоднородности по измерениям акустического поля. / Г. Б. Баканов, А.С. Касымбеков, М.А. Султанов. // III Международная научная конференция. Теория операторов, комплексный анализ и мат. моделирование. 2016.

45 Евстигнеев. Р. О. Итерационный метод решения прямых и обратных двумерных задач акустики с применением параллельных алгоритмов. / Р. О. Евстигнеев, М. Ю. Медведик, А. А. Шмелев // *Эвристические алгоритмы и распределенные вычисления.* 2015. № 1. Т. 2. С. 71 – 81.

46 Гончарский. А. В Итерационные методы решения обратных задач ультразвуковой томографии. / А. В. Гончарский, С. Ю. Романов. // *Вычислительные методы и программирование.* 2015. Т. 16. С. 464 – 475.

47 Зверев. В. А. Принцип обращения акустических волн и голография. *Акустический журнал.* 2004. № 6. Т. 50. С. 792 – 801.

48 Артельный П. В. Фокусировка вибрационного поля в упругих системах конечного размера методом обращения времени. / П. В. Артельный, П. И. Коротин // *Акустический журнал.* 2010. №1. Т. 56. С 3 - 9.

49 Вировлянский. А. Л. Фокусировка звуковых импульсов методом обращения времени на стокилометровых трассах в глубоком море. / А. Л.

Вировлянский, А. Ю. Казарова, Л. Я. Любавин // Акустический журнал. 2012. № 6. Т 58. С 723 - 732.

50 Бараш Ю. С. Силы Ван – Дер- Ваальса. // М: Наука, 1988 – 322с.

51 Y i l m a z. O. Z. Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data. / Stephen M. Doherty. // Society of Exploration Geophysicists. 2001. V. 1. P. 2027.

52 Qiu. Liu – chao. Numerical simulation of submarine landslide tsunamis using particle based methods. / Liu – chao. Qiu. Feng Jin. // Journal of Hydrodynamics. 2017. № 29. P. 542 – 551.

53 Liu G.R. Smoothed particle hydrodynamics: A mesh free particle method. / G. R. Liu. M. B. Liu. // Singapore. World Scientific. 2003.

54 J. J. Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics. // Reports on Progress in Physics. 2005. №68. P. 1703 – 1759.

55 Кузовова А. Е. Моделирование акустических процессов в твердых телах на основе взаимодействия частиц. / Кузовова А. Е, Суханов Д. Я // Информационно – измерительная техника и технологии. VIII Международная научно – практическая конференция в рамках Международного форума «Интеллектуальные системы 4 –й промышленной революции». 2017. С. 92 – 93.

56 Городецкий. Е. Е. Силы молекулярного взаимодействия. // Квант. 1987. № 1. С. 31 - 34.

57 Физико-механические испытания URL: <http://www.ckp.tsu.ru/services/22/820/> (дата обращения 19.05.18).

58 Универсальная электромеханическая испытательная машина INSTRON 3369 URL: <http://www.ckp.tsu.ru/about/equipment/7/21/> (дата обращения 19.05.18).

59 Суханов Д. Я. Решение акустических томографических задач на основе численного моделирования динамики частиц. / Д. Я. Суханов, Кузовова А. Е // Информационно – измерительная техника и технологии. VIII Международная научно – практическая конференция в рамках

Международного форума «Интеллектуальные системы 4 –й промышленной революции». 2017. С. 136 – 137.

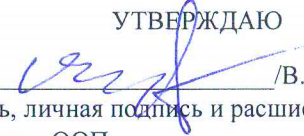
60 Kuzovova A. Solution of Acoustic Tomographic Problems on the Basis of Numerical Simulation of Particle Dynamics. / A. Kuzovova, I. Kuzmenko // MATEC Web of Conferences. 2018.

61 Kuzovova A. Modeling of Acoustic Processes in Solids Based on Particle Interaction. / A. Kuzovova, T. Muksunov // MATEC Web of Conferences. 2018.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Отчет о патентных исследованиях**



УТВЕРЖДАЮ

  
/В.П. Якубов/  
должность, личная подпись и расшифровка подписи  
руководителя ООП

"04" сентября 2017г.

**ЗАДАНИЕ**  
**на проведение патентных исследований**

Наименование работы (темы) Решение задач акустической томографии путем численного моделирования методом конечных разностей во временной области

Шифр работы (темы) 03.04.03

Этап работы завершающий, сроки его выполнения 05.09.2017- 05.12.2017

Задачи патентных исследований Основная задача: исследование технического уровня и тенденций развития программ, алгоритмов и методов для численного моделирования акустических процессов в твердых телах.

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН**

Виды патентных исследований	Подразделения-исполнители (соисполнители)	Ответственные исполнители (Ф.И.О.)	Сроки выполнения патентных исследований. Начало. Окончание	Отчетные документы
1. Исследование технического уровня	Кафедра радиофизики ТГУ	Кузорова А. Е.	05.09.2017-05.10. 2017	отчет о поиске
2. Анализ тенденций развития	Кафедра радиофизики ТГУ	Кузорова А.Е.	06.10.2017-06.11. 2017	отчет о поиске
3. Обоснование технического уровня объектов разработки	Кафедра радиофизики ТГУ	Кузорова А.Е.	07.11.2017-05.12. 2017	отчет о поиске

Руководитель  
патентного  
подразделения

  
личная подпись

В. П. Беличенко  
расшифровка подписи

04.09.17  
дата

Руководитель  
ВКР магистра

  
личная подпись

Д. Я. Суханов  
расшифровка подписи

04.09.17  
дата

**Регламент поиска**

18.09.2017

*дата составления регламента*

Наименование работы (темы) Решение задач акустической томографии путем численного моделирования методом конечных разностей во временной области.

Шифр работы (темы) 03.04.03

Номер и дата утверждения задания от 04.09.2017 Этап работы завершающий

Цель поиска информации (в зависимости от задач патентных исследований, указанных в задании)

Задачей является исследование существующих программ, методов, алгоритмов для численного моделирования акустических процессов в твердых телах, а также устройств на их основе. На этом основании целью поиска информации является найти программы, методы, алгоритмы для численного моделирования акустических процессов в твердых телах, а также устройства на их основе.

Обоснование регламента поиска поиск провести в базах ФИПС и USPTO

Начало поиска 05.09.2017 Окончание поиска 05.12.2017

Предмет поиска (объект исследования, его составные части, товар)	Страна поиска	Источники информации, по которым будет проводиться поиск				Ретроспективность	Наименование информационной базы
		патентные		НТИ			
		Наименование	Классификационные рубрики МПК	Наименование	Рубрики УДК		
1	2	3	4	5	6	7	8

Программы, методы, алгоритмы для численного моделирования акустических процессов	Россия, США	База данных	МПК	Акустический журнал Акустические методы Журнал вычислительной математики и математической физики Теоретическая физика и моделирование	534.2:517.9 620.179.16 519.634 004.942	2013-2018 (Россия) 1980-2018 (США)	База данных ФИПС (Россия)
		ФИПС (Россия)	A61B G06T G01S				База данных USPTO (США)
		База данных USPTO (США)	G10K				База данных USPTO (США)
			G01N				
			G01H3 H04B				

Руководитель  
ВКР магистра

  
личная подпись

Д. Я. Суханов  
расшифровка  
подписи

18.09.17  
дата

Руководитель  
патентного  
подразделения

  
личная подпись

В. П. Беличенко  
расшифровка  
подписи

18.09.17  
дата

## ОТЧЕТ О ПОИСКЕ

В.1 Поиск проведен в соответствии с заданием

от 04.09.2017 и Регламентом поиска № от 18.09.2017

В.2 Этап работы завершающий

В.3 Начало поиска 05.09.2017 Окончание поиска 05.12.2017

В.4 Сведения о выполнении регламента поиска (указывают степень выполнения регламента поиска, отступления от требований регламента, причины этих отступлений) – регламент поиска выполнен полностью.

В.5 Предложения по дальнейшему проведению поиска и патентных исследований – провести поиск патентов аналогов наиболее значимых патентов, обнаруженных при проведении патентных исследований. Более детально проанализировать направления исследований ведущих в рассматриваемых областях фирм. Расширить поиск текущей научной и патентной информации в смежных областях.

В.6 Материалы, отобранные для последующего анализа

*Таблица В.6.1 – Патентная документация*

Предмет поиска (объект исследования, его составные	Страна выдачи, вид и номер охранного документа.	Заявитель (патентообладатель), страна. Номер заявки, дата приоритета.	Название изобретения	Сведения о действии охранного
---	---	---	----------------------	-------------------------------

части)	Классификационный индекс			документа
1	2	3	4	5
Программы, методы, алгоритмы для численного моделирования акустических процессов	1. Свидетельство о регистрации РФ, № 2015661657	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Марийский государственный университет» (RU)  2015618522 17.09.2015	Программа для ЭВМ:  Численное решение двумерной обратной задачи акустического зондирования в неоднородной среде с использованием метода квадратур	Действует.
	2. Свидетельство о регистрации РФ, № 2014662143	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Марийский государственный университет» (RU)	Программа для ЭВМ:  Программа для численного решения трёхмерного волнового уравнения конечно-разностным методом	Действует.
	3. Patent US No. 14,838,522, МПК	SAMSUNG	Tomography imaging apparatus and method of reconstructing tomography image	Действует.

	A61B 6/00 (2006.01) G06T 7/00 (2006.01)	ELECTRONICS CO., LTD. (Suwon-si, KR) (US) 14/838522, 08.28.2015		
	4. Patent US No. 4,662,222, МПК G01S15/89 G06T11/00 G01N29/04	Johnson; Steven A. (US) 06/684801, 12.21.1984	Apparatus and method for acoustic imaging using inverse scattering techniques	Действует
	5. Patent US No. 4,594,662, МПК G01S15/89 G06T11/00 G01V5/00 G01N29/00 G06F15/42	Schlumberger Technology Corporation (New York, NY) (US) 06/533391, 09.19.1983	Diffraction tomography systems and methods with fixed detector arrays	Действует
	6. Patent US No. 4,317,369, МПК A61B8/08 A61B8/13	University of Utah (Salt Lake City, UT) (US) 06/147990, 05.08.1980	Ultrasound imaging apparatus and method	Действует

	G01S15/89 G06T11/00 G10K11/34 G01N29/00			
	7. Patent US No. 6,878,115, МПК A61B8/14 A61B8/14	Ultrasound Detection Systems, LLC (Madison, CT, US) (US) 10/402588, 03.28.2003	Three-dimensional ultrasound computed tomography imaging system	Действует
	8. Patent US No. 8,848,481, МПК G03B42/06 G01H3/12 G01S15/89	Bruel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S (Naerum, DK) (US) 13/002943, 06.26.2009	Reconstructing an acoustic field	Действует
	9. Patent US No. 6,615,143, МПК G01H3/12 G01N29/14 G01N29/44 G01N29/52	Wayne State University (Detroit, MI) (US) 09/796862, 03.01.2001	Method and apparatus for reconstructing and acoustic field	Действует

	H04B15/00			
	10. Patent US No. 9,953,440, МПК G06T11/00	GENERAL ELECTRIC COMPANY (Schenectady, NY) (US)  14/597896, 01.15.2015	Method for tomographic reconstruction	Действует
	11. Patent WIPO No. WO/1998/012667  A61B8/08  A61B8/14  G01S13/89  G01S15/89  G06T11/00	Johnson, Steven A. (US) Borup, David T. (US) Wiskin, James W. (US) Natterer, Frank (DE) Wubeling F. (DE) Zhang, Yonghzhi (US)  PCT/US1997/01522, 08.28.1997	Wavefield imaging using inverse scattering techniques	Действует
	12. Patent US No. 5,905,261, МПК G01N21/47  A61B5/00  G01N21/64	SCHOTLAND; John Carl Ishii; Masaru (US)  08/937715, 09.25.1997	Imaging system and method using direct reconstruction of scattered radiation	Действует



	<p>13. Заявка на изобретение РФ № 2004131526/14, МПК A61B 8/08 (2000.01)</p>	<p>Ангельсен Бьерн А. Дж. (NO), Йохансен Тонни Ф. (NO)</p>	<p>Ультразвуковая томография объектов посредством сканирования во множественных плоскостях</p>	
	<p>14. Patent US No. 2012/0195458, МПК G06K9/36</p>	<p>L-3 Communications Security and Detection Systems Inc. (Woburn, MA,) (US) 13/364,182, 02.01.2012</p>	<p>Reconstruction method using direct and iterative techniques</p>	<p>Действует</p>
	<p>15. Patent WIPO No. WO/1996/032063, МПК  G01N21/27  G01N21/47  A61B6/00</p>	<p>BELL COMMUNICATIONS RESEARCH, INC. (US) PCT/US1996/004288, 04/01/1996</p>	<p>Simultaneous absorption and diffusion imaging system and method using direct reconstruction of scattered radiation</p>	<p>Действует</p>
	<p>16. Patent US No. 5,588,032, МПК  A61B8/08  A61B8/14  G01H3/12  G01N23/205</p>	<p>Johnson; Steven A. Wiskin; James W. Borup; David T. Christensen; Douglas A. Stenger; Frank (US) 07/961768, 10.14.1992</p>	<p>Apparatus and method for imaging with wave fields using inverse scattering techniques</p>	<p>Действует</p>
	<p>17. Patent US No. 5,747,810, МПК  G01N21/47  G01N21/64</p>	<p>University, Of Pennsylvania (US)  08/449537, 05.15.1995</p>	<p>Simultaneous absorption and diffusion tomography system and method using direct reconstruction of scattered radiation</p>	<p>Действует</p>

Таблица В.6.2 – Научно техническая, конъюнктурная, нормативная документация и материалы государственной регистрации (отчеты о научно-исследовательских работах)

Предмет поиска	Наименование источника информации с указанием страницы источника	Автор, фирма (держатель) технической документации	Год место и орган издания (утверждения, депонирования источника)
1	2	3	4
Программы, методы, алгоритмы для численного моделирования акустических процессов	1. Принцип обращения акустических волн и голография. С.792 – 801.	Зверев. В. А.	Акустический журнал. – 2004. – Т. 50. – № 6.
	2. Итерационные методы решения обратных задач ультразвуковой томографии. С. 464 – 475.	Гончарский. А. В., С. Ю. Романов.	Вычислительные методы и программирование. – 2015. – Т. 16.
	3. Итерационный метод решения прямых и обратных двумерных задач акустики с применением параллельных алгоритмов. С. 71 – 81.	Евстигнеев. Р. О., М. Ю. Медведик., А. А. Шмелев.	Эвристические алгоритмы и распределенные вычисления. –2015. – № 1. Т. 2.
	4. Трехмерное моделирование акустического поля методом конечных разностей во временной области.	Авдеев. Д. А., В. И. Римлянд.	Вестник ТОГУ. – 2016.
	5. Решение динамических задач акустики методом конечных разностей во временной области. С. 12 - 26.	Бархатов. В. А.	Дефектоскопия. 2005. – № 3.

## ***Выводы по результатам патентного исследования***

Целью магистерской диссертации, в рамках которой проводились патентные исследования, является разработка методов решения прямых и обратных задач акустической томографии на основе численного моделирования распространения акустических волн в упругих средах в модели динамики и взаимодействия частиц. Так актуальность в создании программ для численного моделирования акустических процессов показывает патентный поиск. Были найдены 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ на территории РФ. Данные программы применяются для решения волнового уравнения методом конечных разностей и методом квадратур и применяются для решения обратных задач томографии. В то время как в разработанной программе *Acoustic\_Model\_OpenCL* используется волновое уравнение только для оценки скорости звука в среде, а распространения волны от точечного источника описывается уравнением движения Ньютона путем интегрирования ускорения, которое решается методом конечных разностей во временной области. Разработанная программа позволяет не только решить обратную томографическую задачу, но и учесть такие эффекты как дифракция, интерференция, многократные отражения и т.д. Также были найдены патенты США на устройства и способы восстановления томографических изображений. Но следует учесть, что в найденных патентах также как и в свидетельствах о регистрации программ разработанные устройства и алгоритмы обработки основаны на решении волнового уравнения и применены современные технологии по распараллеливанию и высокоскоростные компьютеры. Решение обратных задач основано на обработке множества фрагментарных данных.

В научной работе главной целью является разработать методы решения прямых и обратных задач акустической томографии на основе численного моделирования распространения акустических волн в упругих средах. Поэтому актуальность работы больше подтверждается перечнем статей зарубежных и российских учёных, которые занимаются решением схожих задач, а также показаны статьи для краткого пояснения, какие исследования проводятся и в каких областях находят применение:

- Бархатов. В. А. Решение динамических задач акустики методом конечных разностей во временной области. Основные соотношения. Анализ погрешностей. // Дефектоскопия. 2005. № 3. С. 12 - 26.
- Югов. Н. Т. Алгоритм расчета контактных границ в методе конечных элементов для решения задач высокоскоростного соударения деформируемых твердых тел. / Н. Т. Югов, Н.Н. Белов // Вычислительные технологии. 1998. № 3. Т. 3. С. 94 – 102.
- Месяц Е. А. О выборе числа частиц в методе частиц в ячейках для моделирования задач физики плазмы. / Е. А. Месяц, К.В. Лотов // Вычислительные технологии. 2013. № 6. Т. 18. С. 83 – 96.
- Баканов. Г. Б. Итерационный метод определения границы неоднородности по измерениям акустического поля. / Г. Б. Баканов, А.С. Касымбеков, М.А. Султанов. // III Международная научная конференция. Теория операторов, комплексный анализ и мат. моделирование. 2016.

- Зверев. В. А. Принцип обращения акустических волн и голография. Акустический журнал. 2004. № 6. Т. 50. С. 792 – 801.
- Qiu. Liu – chao. Numerical simulation of submarine landslide tsunamis using particle based methods. / Liu – chao. Qiu. Feng Jin. // Journal of Hydrodynamics. 2017. № 29. P. 542 – 551.
- Johnson. S. A. Wave equation and inverse solution for soft tissue. // S. A. Johnson, G. Stenger, C. Wilcox, J. Ball, M. Berggren // Acoust. Imaging. 1982. V. 11. P. 409 - 423.

Введите текст:

...или загрузите файл:

Файл не выбран...

Выбрать файл...

Укажите год публикации: 2018 ▼

Выберите коллекции

Все	Википедия	Российские журналы
Рефераты	Российские конференции	Энциклопедии
Авторефераты	Иностранные журналы	Англоязычная википедия
Иностранные конференции		
PubMed		

Анализировать

Обработан файл:

Магистерская\_Кузובהва\_А.Е..pdf.

Год публикации: 2018.

Оценка оригинальности документа - 98.79%

Процент условно корректных заимствований - 0.0%

Процент некорректных заимствований - 1.21%

Время выполнения: 18 с.

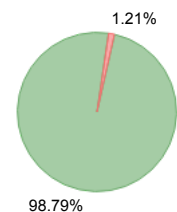
Документы из базы

Источники заимствования

**1. Многомерная согласованная фильтрация в радио- и ультразвуковой томографии** ([http://vak.ed.gov.ru/az/server/php/filer.php?table=att\\_case&fld=autoref&key\[\]=202858](http://vak.ed.gov.ru/az/server/php/filer.php?table=att_case&fld=autoref&key[]=202858))

Авторы: Суханов Дмитрий Яковлевич.

Год публикации: 2015. Тип публикации: автореферат диссертации.

[http://vak.ed.gov.ru/az/server/php/filer.php?table=att\\_case&fld=autoref&key\[\]=202858](http://vak.ed.gov.ru/az/server/php/filer.php?table=att_case&fld=autoref&key[]=202858)[http://vak.ed.gov.ru/az/server/php/filer.php?table=att\\_case&fld=autoref&key\[\]=202858](http://vak.ed.gov.ru/az/server/php/filer.php?table=att_case&fld=autoref&key[]=202858)[Показать заимствования \(5\)](#)

В списке литературы	Источники
	Заимствования

—	1.21%
---	-------

Дополнительно
---------------

[Значимые оригинальные фрагменты](#)[Библиографические ссылки](#)[Искать в Интернете](#)

