

Краевой конкурс творческих работ учащихся
«Прикладные и фундаментальные вопросы математики»

Математическое моделирование

**Моделирование акустических волн в твёрдых средах с
дефектами кристаллической решётки**

Дробинин Антон, Лобачев Владимир,
11 кл., МБОУ «Лицей №1» г. Перми,

Волегов Павел Сергеевич,
доцент ПНИПУ, к.ф.-м. н.

Пермь. 2012.

Оглавление

Введение	3
Актуальность и новизна работы	4
Цель работы	4
Задачи	4
1. Концептуальная постановка задачи	6
2. Математическая постановка задачи	8
3. Метод решения	10
4. Проверка адекватности модели	11
5. Исследование распространения акустических волн в среде с дефектами	18
6. Способы дефектоскопии (замещение, вакансия)	21
7. Анализ прочих экспериментальных данных	25
8. Способы дефектоскопии (линейная дислокация)	28
9. Заключение	30
10. Список литературы	31

Введение

Акустические волны – это один из видов механических колебаний, которые представляют собой изменение состояние среды, распространяющееся в пространстве с течением времени. Достаточно взять одну частицу среды и передвинуть её из положения равновесия, чтобы нарушить равновесие всех соседних частиц. При этом сумма сил, которые осуществляют взаимодействие между частицами, для каждой из частиц станет отличной от нуля, и соседние частицы придут в движение. Так как частицы покинули своё положение равновесия, соседние с ними частицы также начнут движение, в свою очередь, действуя на следующие и так далее. Таким образом, область сжатия начнёт двигаться в среде. За областью сжатия следует область растяжения, образуется ряд чередующихся областей сжатия и растяжения, распространяющихся в среде в виде волны. Каждая частица упругой среды в этом случае будет совершать колебательные движения. При распространении упругих волн частицы среды не переносятся, а лишь совершают колебательные движения относительно точек равновесия.

При распространении акустической волны можно наблюдать следующие явления:

- Резонанс – резкое возрастание амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты изменения внешней силы, действующей на систему, с частотой свободных колебаний.
- Интерференция – сложение в пространстве двух (или нескольких) волн, при котором образуется постоянное во времени распределение амплитуды результирующих колебаний в различных точках пространства.
- Дифракция – отклонение от прямолинейного распространения волн, огибание волнами препятствий.
- Угол отражения волны от поверхности равен углу падения (согласно принципу Гюйгенса).

Актуальность и новизна работы

Новизна выполняемой работы состоит в следующем:

- Будет изучен метод моделирования, который часто используется при решении огромного количества задач.
- Созданная модель позволит более детально рассмотреть движение акустической волны в кристаллической среде.

Актуальность работы состоит в попытке создать модель распространения волн в телах обладающих дефектами кристаллической решётки.

Цель работы

Целью работы является анализ распространения акустических волн в кристаллическом теле и разработка способов обнаружения дефектов в материале, для чего необходимо создать модель, которая позволила бы наблюдать за движением волны и удовлетворяла бы следующим минимальным условиям:

1. Распространение волн в одномерных и двумерных средах.
2. Адекватное распространение волны при наличии в среде различных дефектов.
3. Ясная видимость явлений, которые могут возникать в реальности.
4. Анализ полученных данных и разработка способов обнаружения дефектов

Задачи

1. Поиск и изучение литературы об упругих волнах и механических колебаниях.
2. Математическая постановка задачи моделирования.
3. Написание программы для самого простого случая, одномерной цепочки одинаковых атомов без дефектов. Тестирование программы (главным образом проверка на адекватность).
4. Обобщение модели на случай двумерного тела.

5. Дальнейшее усложнение, путем увеличения размеров тела, а так же добавления различных дефектов.
6. Анализ экспериментальных данных, разработка способов дефектоскопии.

1. Концептуальная постановка задачи

Согласно молекулярно-кинетической теории все тела состоят из атомов – маленьких частиц, которые находятся в постоянном, неуничтожимом движении, притягиваются на большом расстоянии и отталкиваются на близком.

Для выполнения данной работы было принято решение создать имитационную математическую модель.

Для решения дифференциальных уравнений модели был использован метод Эйлера.

Имитационное моделирование — это метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему и с ней проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе, такую модель можно «проиграть» во времени как для одного испытания, так и заданного их множества. Экспериментирование с моделью называют имитацией (имитация — это постижение сути явления, не прибегая к экспериментам на реальном объекте).

Имитационным моделированием иногда называют получение частных численных решений сформулированной задачи на основе аналитических решений или с помощью численных методов.

Имитационная модель — логико-математическое описание объекта, которое может быть использовано для экспериментирования на компьютере в целях проектирования, анализа и оценки функционирования объекта.

Атомы образуют решётку, в которой все атомы расположены в своих положениях равновесия (находятся на одинаковом расстоянии от соседей) и не имеют начальной скорости. Все атомы соединены упругими связями.

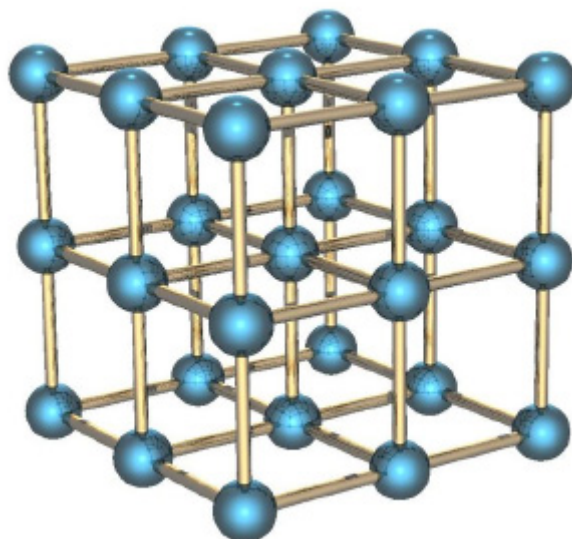


Рис. 1 Кристаллическая решётка [10]

Так как при распространении волны происходит последовательное увеличение и уменьшение расстояния между атомами, можно представить, что материал представляет собой совокупность материальных точек (сетку или решетку), соединенных линейно-упругими пружинами.

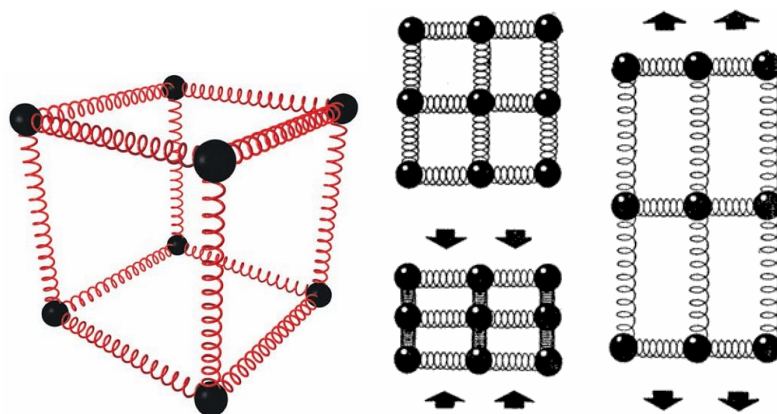


Рис. 2 Имитация решётки и сил взаимодействия зарядов[15]

Атомы можно представить материальными точками, потому что их размеры бесконечно малы по сравнению с макроскопическими телами. Это даёт возможность использовать закон Гука. Но в таком случае деформации материала не могут выходить из предела пропорциональности.

Кроме того, воспользуемся следующими упрощениями:

- Пружинки, соединяющие атомы, не имеют массы, так как в реальной ситуации пружинок вовсе нет.
- В первом приближении материал имеет идеальную структуру, то есть не имеет дефектов.

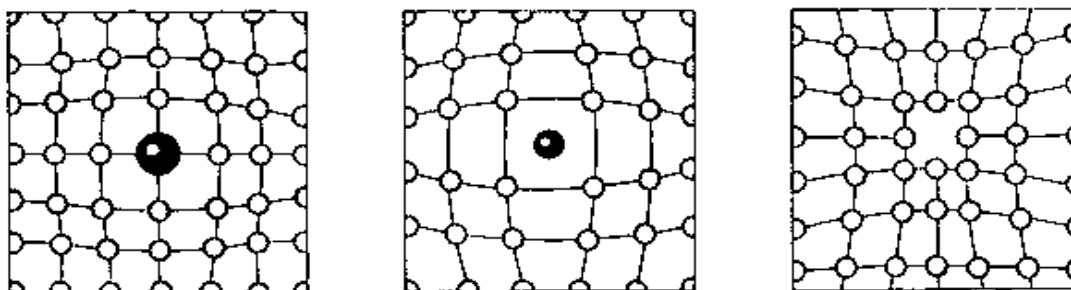


Рис. 3 Виды точечных дефектов (замещение, внедрение, вакансия)[14]

- Атомы находятся в положениях равновесия и не совершают колебаний. Амплитуда их колебаний очень мала, а скорость имеет порядок приблизительно 10^6 , из-за чего этими колебаниями можно пренебречь.
- Пренебрегаем силой сопротивления внешней среды и притяжением Земли. Сила притяжения пренебрежимо мала в сравнении с силами межмолекулярного взаимодействия. Пренебрежение силой сопротивления заключается в том, что в межатомном пространстве не наблюдается среды. Каждый атом взаимодействует с четырьмя ближайшими соседями.

2. Математическая постановка задачи

В данной главе будут рассмотрено действие на i,j элемент цепочки, а так же проекция сил на соответствующие координатные оси. Также будет получена зависимость проекции ускорения произвольной частицы от координаты соседних с ней точек.

Ниже приведён список используемых в данной работе физических величин и обозначений:

i – номер точки по горизонтали

j – номер точки по вертикали

x_{ij} - координата

m – масса материальной точки

\vec{a} - ускорение

x, y – оси

\vec{v} – скорость

t – время

\vec{F}_{ij} - сила, действующая со стороны точки i, j

k – коэффициент жесткости

l_0 - начальное расстояние между атомами

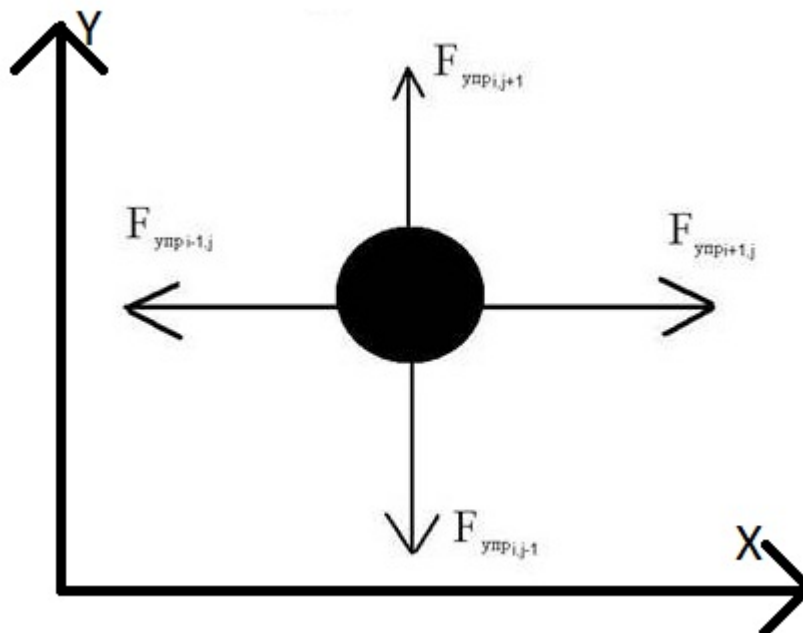


Рис. 4 Силы, действующие на частицу i, j

Запишем второй закон Ньютона (1) для произвольной частицы (рис. 4), а так же формулы для вычисления ускорения (2) и скорости(3).

$$m\vec{a} = \vec{F}_{i-1j} + \vec{F}_{i+1j} + \vec{F}_{ij+1} + \vec{F}_{ij-1}; \quad (1)$$

$$a_x = \frac{\delta v_x}{\delta t}; \quad (2)$$

$$v_x = \frac{\delta x}{\delta t}; \quad (3)$$

Проецируем второй закон Ньютона на оси x (4) и y (5)

$$x: ma_x = k |(x_{ij} - x_{(i-1)j}) - l_0|_x + k |(x_{ij} - x_{(i+1)j}) - l_0|_x; \quad (4)$$

$$y: ma_y = k |(y_{ij} - y_{i(j-1)}) - l_0|_y + k |(y_{ij} - y_{i(j+1)}) - l_0|_y; \quad (5)$$

Преобразуем формулы (4) и (5) для того, чтобы получить зависимости проекций ускорения произвольной частицы от координат соседних с ней точек.

$$a_x = \frac{k|(x_{ij} - x_{(i-1)j}) - l_0|_x + k|(x_{ij} - x_{(i+1)j}) - l_0|_x}{m} \quad (6)$$

$$a_y = \frac{k|(y_{ij} - y_{i(j-1)}) - l_0|_y + k|(y_{ij} - y_{i(j+1)}) - l_0|_y}{m} \quad (7)$$

3. Метод решения

Для решения дифференциальных уравнений модели был использован метод Эйлера.

Метод Эйлера — наиболее простой численный метод решения (систем) обыкновенных дифференциальных уравнений.

Метод Эйлера является явным, одношаговым методом.

При численном методе решение берется определенная зависимость (функция), начальное условие которой известно, так же берется определенный шаг решения. В дальнейшем пошагово решается данное дифференциальное уравнение, где численным решением будет определенный набор точек.

Решение дифференциальных уравнений методом Эйлера является методом вычисления со средней точностью, и точность вычисления данного метода зависит от количества разбиений интервала интегрирования.

Заменим бесконечно малые величины на конечные:

$$a \approx \frac{\Delta v}{\Delta t}; \quad (8)$$

$$v \approx \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (9)$$

Теперь, зная зависимость ускорения от положения тела в данный момент, можно найти скорость (8,9), которую будет иметь частица на следующем такте (её будем считать нулевой).

$$V_x = V_{x0} + a_x \Delta t \quad (10)$$

$$V_y = V_{y0} + a_y \Delta t \quad (11)$$

Формулы для нахождения координат:

$$x = x_0 + V_{x0} \Delta t + \frac{a_x (\Delta t)^2}{2} \quad (12)$$

$$y = y_0 + V_{y0} \Delta t + \frac{a_y (\Delta t)^2}{2} \quad (13)$$

$$x = x_0 + V_{x0} \Delta t \quad (14)$$

$$y = y_0 + V_{y0} \Delta t \quad (15)$$

Было использовано два метода расчёта координат: считая движение частиц на шаге равномерным (12,13) и равноускоренным(14,15).

4.Проверка адекватности модели

В построенной модели наблюдаются волновые явления, доказывающие её адекватность:

На рисунках 6-10 показано распространение волны. Чёрные точки – это атомы, зелёные линии – недеформированные пружинки, синие линии – растянутые пружинки, красные – сжатые. Все атомы изначально располагаются на равных расстояниях от своих соседей и неподвижны, то есть представляют собой идеальную кристаллическую решетку.

На рисунке 6 показан один из способов запуска волны: частица «оттягивается» от состояния, в котором она бы покоилась, и отпускается. В результате взаимодействия с частицами, которые соединены с ней красными линиями, частица приобретает ускорение и движется к своему положению равновесия. Из-за присущей частице инерции она пролетает положение равновесия и движется к двум соседним частицам, продолжая взаимодействовать с ними (отталкивать их). Эти две частицы начинают движение и отталкивают соседние с ними частицы и т.д.

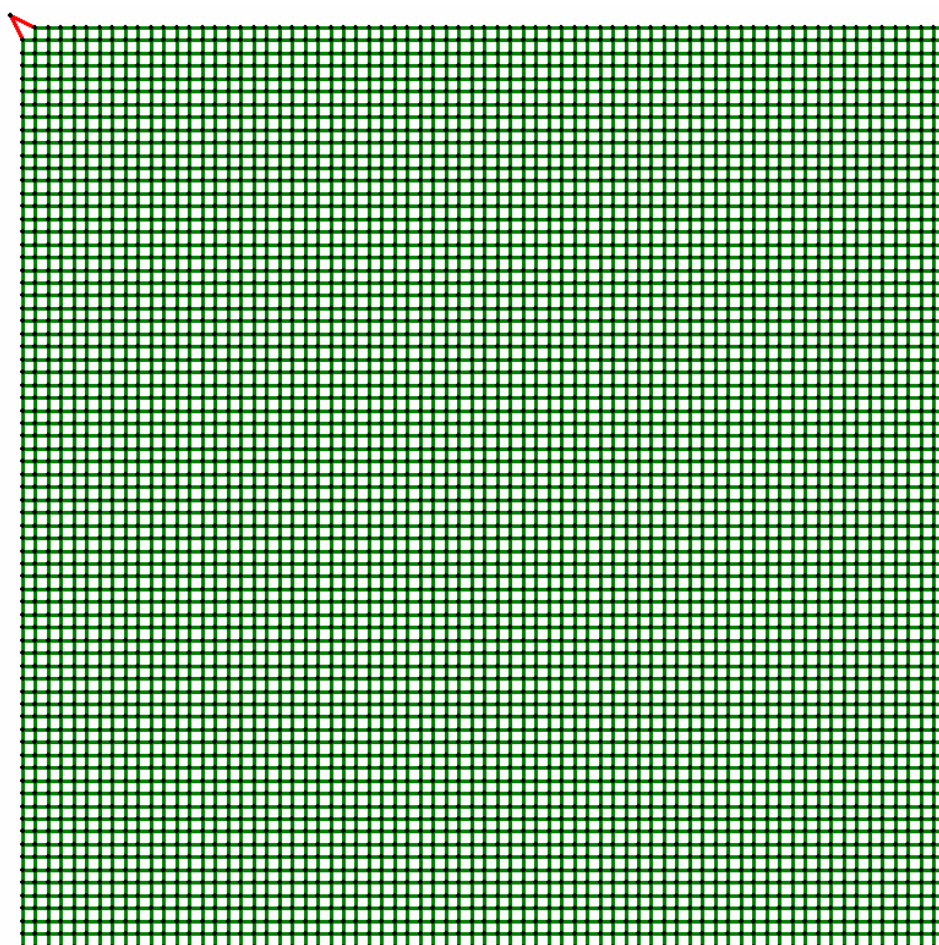


Рис.6 Момент запуска волны (все атомы покоятся; верхний, левый атом смещен относительно своего положения равновесия)

Через некоторое время волна, запущенная на рисунке 6, доходит до фазы на рисунке 7. При переходе от рисунка 7 к рисунку 8 волна сталкивается с правой и нижней границами материала. Происходит отражение волны. Отраженная волна движется в обратном направлении.

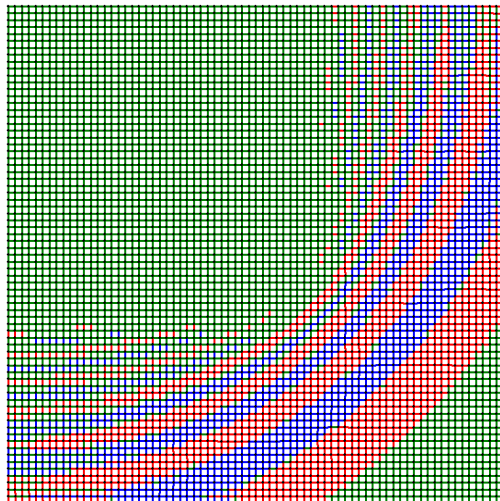


Рис.7 Волна, запущенная на рисунке 6, достигает границ материала

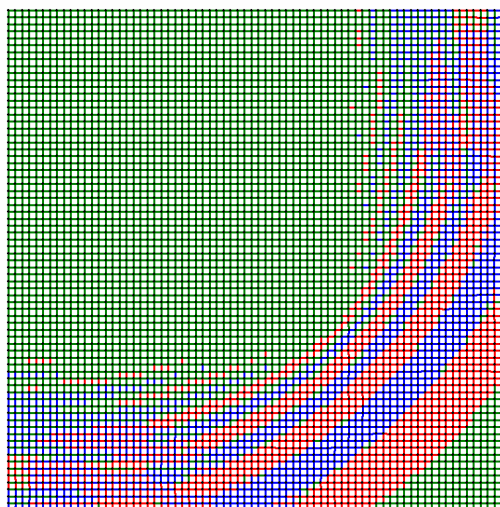


Рис.8 Волна отражается от свободных границ

На рисунке 10 две отраженные волны складываются. Происходит интерференция. Это хорошо видно по ярким пятнам, имеющим форму параллелограмма, в центре изображения.

Также на рисунках можно заметить, что у волны есть фронт и что волны затухают со временем.

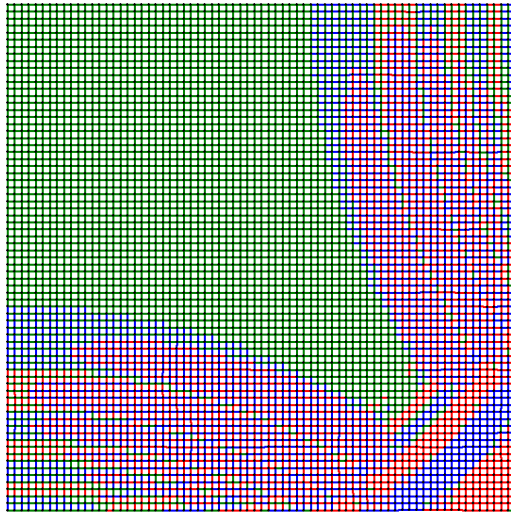


Рис.9 Движение отраженных волн

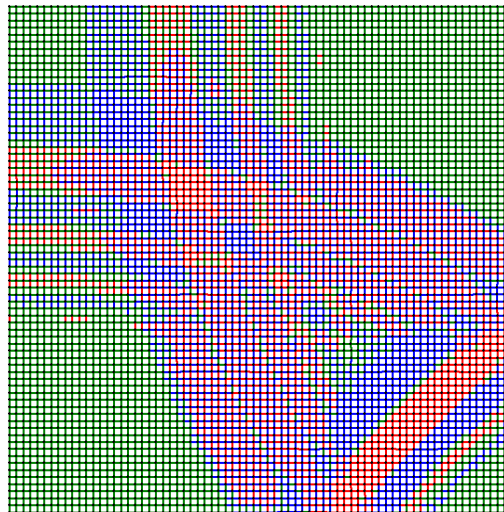


Рис.10 Интерференция отраженных волн

На рисунках 11-12 показано явление дифракции. Волна распространяется не плоским фронтом, а является сферической.

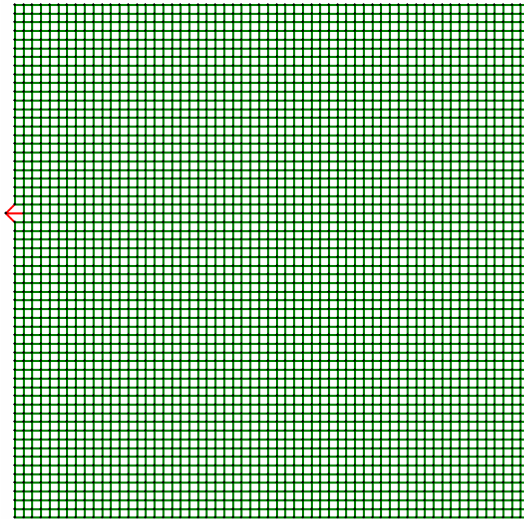


Рис.11 Момент запуска волны (все атомы покоятся; один из атомов левой границы смещен относительно своего положения равновесия)

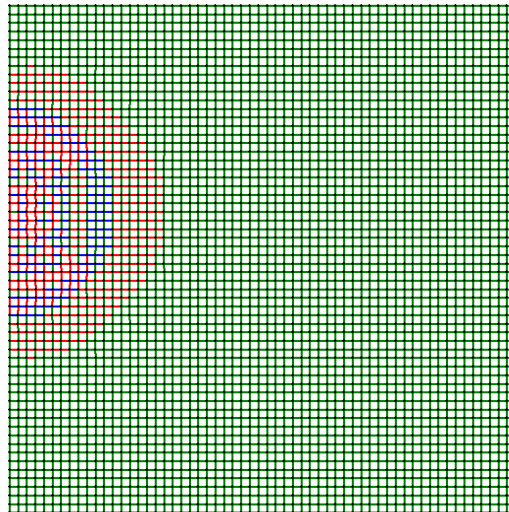


Рис.12 Распространение сферической волны

На рисунках 13,14 показаны две фазы стоячей волны, полученной в написанной программе.

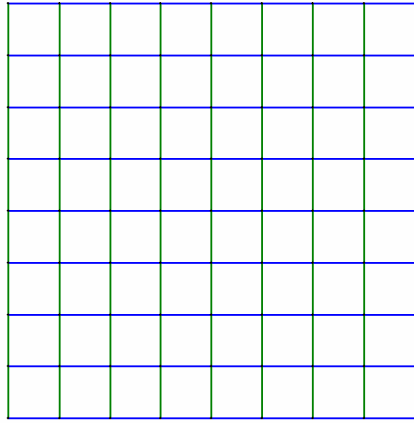


Рис.13 Стоячая волна (фаза 1)

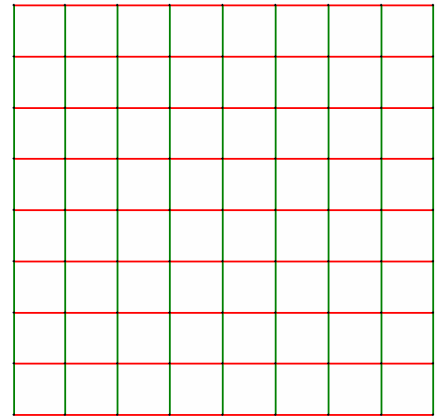


Рис.14 Стоячая волна (фаза 2)

Метод Эйлера, который был использован, подразумевает увеличение точности вычислений при уменьшении шага интегрирования. Поэтому при слишком большом шаге модель становится неадекватной. На рисунках 15,16 показаны варианты развития при слишком большом шаге (примерно 1 секунда). Из-за большой погрешности пластинка как бы взрывается. Все предыдущие рисунки были получены при шаге в одну десятую секунды. При дальнейшем уменьшении шага различия становятся незначительными (волна в целом проходит те же состояния, различия есть, но невидны). Поэтому в большинстве опытов шаг составлял одну десятую секунды.

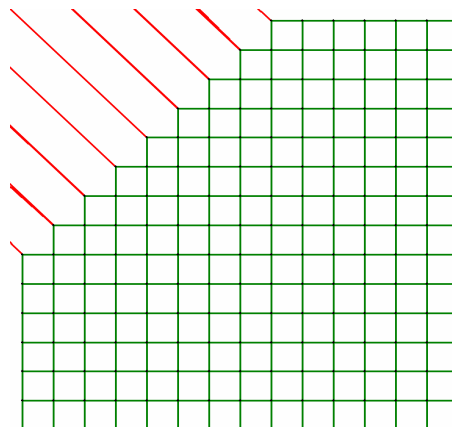


Рис.15 Неправильная работа программы из-за слишком большого шага дифференцирования 1

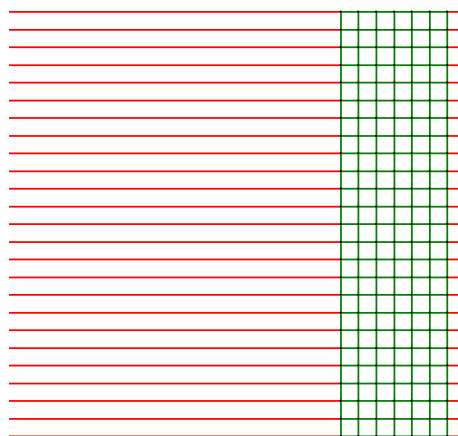


Рис.16 Неправильная работа программы из-за слишком большого шага дифференцирования 2

Большинство из представленных выше рисунков были сделаны в программе, где координаты частиц рассчитываются по формулам (12,13), потому что они более наглядны. В модели с формулами (14,15) все эти явления так же выполняются, хотя их сложнее разглядеть.

На рисунках 17-20 показаны аналоги некоторых предыдущих рисунков, сделанные в модели с расчётом координат по формулам (14,15).

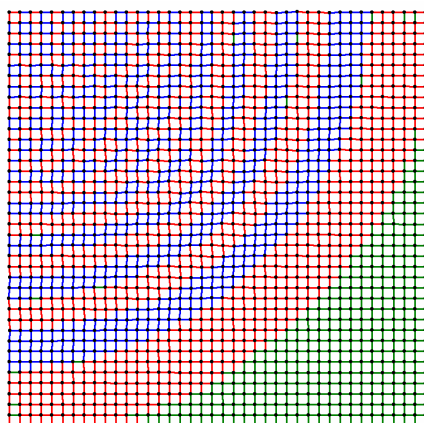


Рис.17 Аналог рисунка 7 (Волна, запущенная на рисунке 6, достигает границ материала)

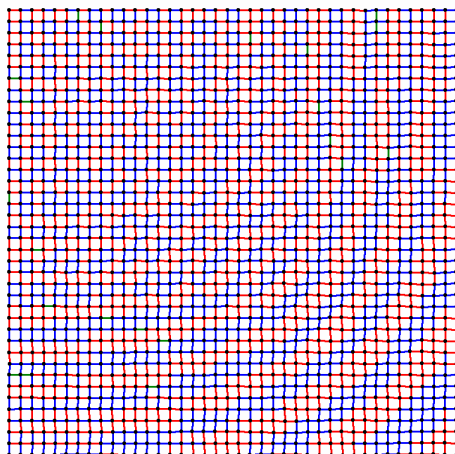


Рис.18 Аналог рисунка 8 (Волна отражается от свободных границ)

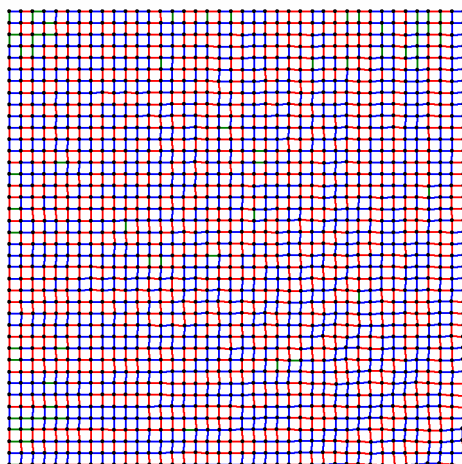


Рис.19 Аналог рисунка 9 (Движение отраженных волн)

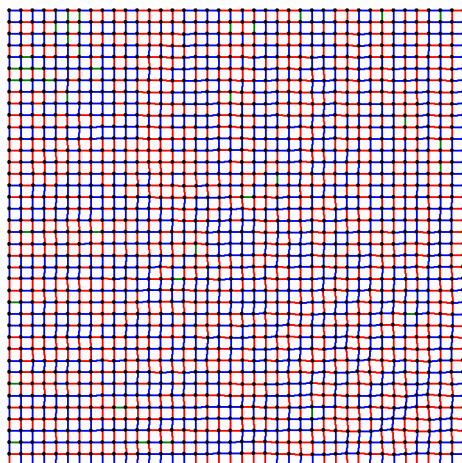


Рис.20 Аналог рисунка 10 (Столкновение отраженных волн и их интерференция)

Следует отметить, что для использования метода Эйлера необходимо знать оптимальный шаг дифференцирования (при нём вычислительные ошибки будут пренебрежимо малы). Оптимальный шаг можно определить, наблюдая за полной энергией системы. Система, за которой ведётся наблюдение,

является замкнутой и неподвижной, поэтому полная энергия системы должна оставаться постоянной. На графике 1 представлена зависимость полной энергии системы от времени. При шаге в 0.000000000001 секунды энергия системы остаётся постоянной.

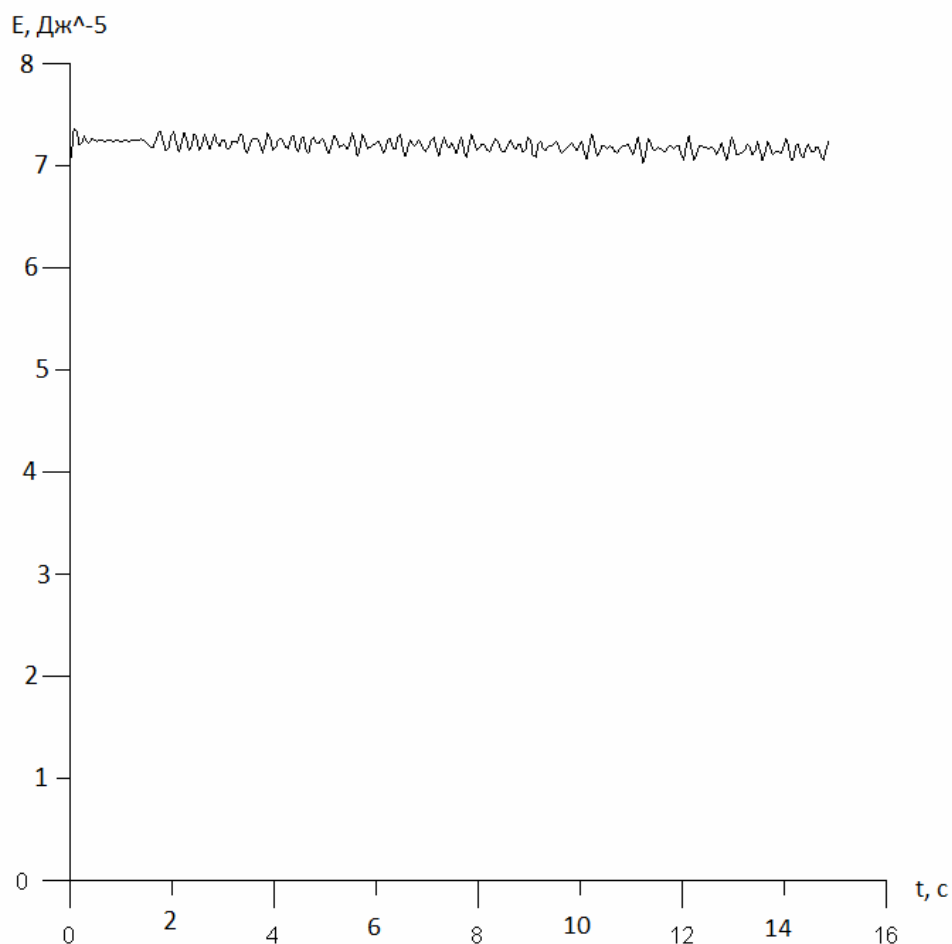


График 1 Зависимость полной энергии от времени при шаге 0.000000000001 секунды

5. Исследование распространения акустических волн в среде с дефектами

Упругие волны были выбраны темой учебно-исследовательской работы потому, что сейчас существует много областей, где они применимы. Одной из крупных областей является дефектоскопия.

С помощью акустических методов в заготовках и изделиях, изготовленных практически из любых материалов, можно обнаружить поверхностные и внутренние дефекты, представляющие собой нарушение сплошности, неоднородность структуры, зоны поражения межкристаллитной коррозией, дефекты склейки, пайки, сварки и т.п. Акустические методы позволяют измерять геометрические параметры, например толщину при одностороннем доступе к изделию, а также физико-механические свойства материалов без их разрушения. В последнее время эти методы с успехом используют для изучения кинетики начальной стадии разрушения образцов и изделий при усталостных испытаниях [13] .

Важным преимуществом акустических методов является возможность их применения для контроля элементов машин и конструкций в условиях эксплуатации без их демонтажа, особенно в тех случаях, когда требуется обеспечить надежную работу дорогостоящих и уникальных объектов, а также машин и конструкций ответственного назначения.

Преимущества акустических методов:

- Высокая чувствительность, позволяющая выявлять мелкие дефекты.
- Большая проникающая способность, позволяющая обнаруживать внутренние дефекты в крупногабаритных изделиях
- Возможность определения места и размеров дефектов
- Практически мгновенная индикация дефектов, позволяющая автоматизировать контроль
- Возможность контроля при одностороннем доступе к изделию
- Простота и высокая производительность контроля
- Полная безопасность работы оператора и окружающего персонала

К недостаткам акустических методов относится необходимость разработки специальных методик контроля отдельных типов деталей, необходимость сравнительно высокой чистоты обработки поверхности

контролируемых объектов и наличие мертвых зон, снижающих эффективность контроля.

Акустические методы контроля это лишь один из многих способов применения упругих волн. Так же волны, в особенности ультразвук, часто используются в медицине, биологии, производстве и многих других областях.

6. Способы дефектоскопии (замещение, вакансии)

На рисунке 21 показано распространение простой продольной волны, но в центре пластинки находится дефект (вакансия), который нужно обнаружить. Когда волна проходит через дефект, она частично отражается от него. Отраженная от дефекта волна показана на второй и третьей частях рисунка. Она вернется к левой границе пластинки раньше, чем это сделает волна, отразившаяся от правой свободной границы.

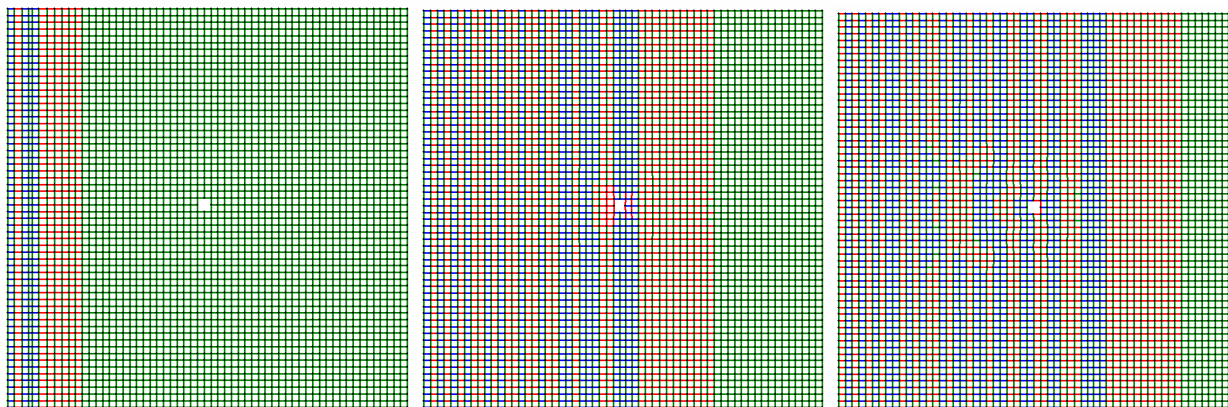


Рис.21 Распространение волны в пластинке с вакансией в центре

Следовательно, дефект в материале можно обнаружить, анализируя время, за которое волна успевает вернуться. В однородном материале с одинаковой толщиной в любой точке поверхности это время будет одинаковым.

Из рисунка 21 можно сделать ещё один важный вывод. От дефекта отражается лишь часть энергии волны, поэтому отраженная от дефекта волна будет иметь меньшую амплитуду.

На рисунке 22 показан такой же запуск волны, как и на рисунке 21, но кристаллическая решётка представляет собой сетку 15X15 атомов, а не 60X60. В такой небольшой системе хорошо наблюдать, что левая и правая границы пластинки деформируются. Дефект как бы отбрасывает тень и для первой волны, и для отраженной от стенки. Из-за этой тени смещение частиц на левой и правой границах будет неоднородным, что можно было бы зарегистрировать.

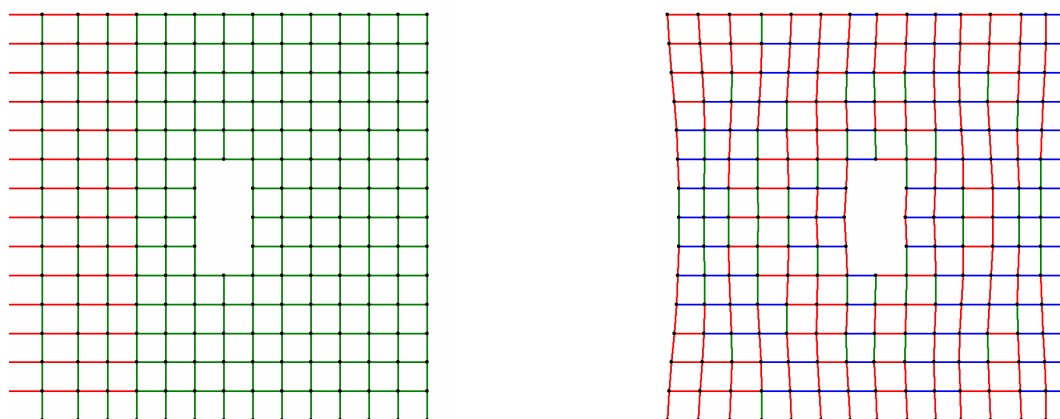


Рис.22 Деформация кристаллической решётки с вакансией

На следующем рисунке 23 показан вариант, когда дефект расположен на поверхности. Такой дефект можно обнаружить при помощи тех способов, которые уже были отмечены ранее.

В этом эксперименте есть отличие от предыдущих опытов: волна была запущена не слева направо, а сверху вниз, и дефекта первой достигла волна, отраженная от нижней границы. Прямо за дефектом образовалось небольшое возмущение, обозначенное синим цветом. Это возмущение отличается от фронта волны и движется перед ним. Поэтому зарегистрировав возмущение, отличающееся от фронта волны, можно говорить о наличии в материале дефекта.

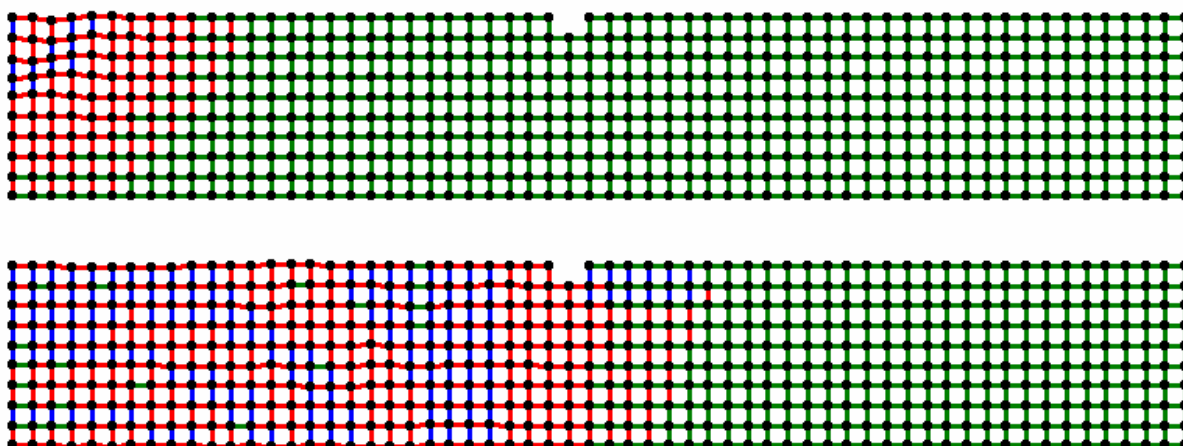


Рис.23 Распространение волны, отраженной от нижней поверхности, в среде с дефектом (вакансией) на поверхности

Для дефектов типа замещение все выше перечисленные способы тоже выполняются.

Модель является довольно грубым приближением и показывает явления только качественно, также возможности вычислительной техники не позволяют сделать эксперименты близкими к реальности, поэтому рассматриваются крайние случаи (например, закрепление атома вместо того, чтобы увеличить его массу вдвое). Несмотря на то что в реальности эксперименты, приведённые в работе, провести не получится, качественно данные, полученные из модели, такие же как и в реальных ситуациях.

На рисунке 24 показан тот же опыт что и на рисунке 22, но атом посередине не удалён, а закреплён на месте. Наблюдаются схожие деформации границ. Начальные деформации сетки из-за более тяжелого атома не учитываются.

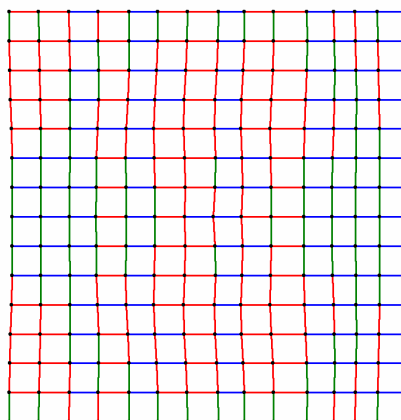


Рис.24 Деформация кристаллической решётки с замещением

На рисунке 25 показан тот же опыт что и на рисунке 21, но атом посередине не удалён, а закреплён на месте. Наблюдаются схожее отражение волн от дефекта.

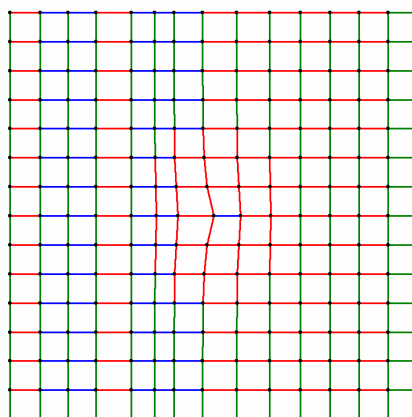


Рис.25 Отражение волн от дефекта (замещение)

На рисунке 26 представлен тот же опыт, что и на рисунке 23, но с закреплённым атомом. На этом рисунке можно видеть картину, повторяющую ту, что наблюдалась при отсутствии атома.

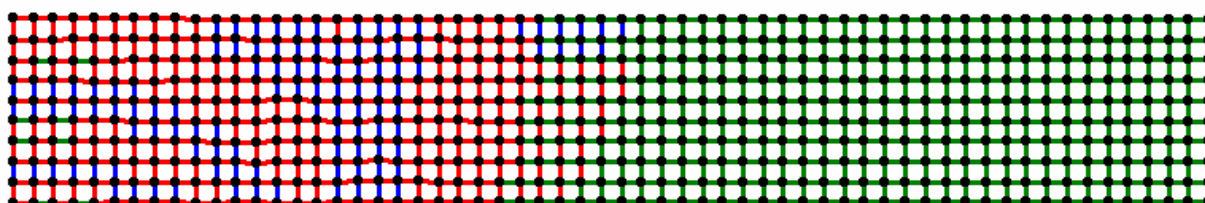


Рис.26 Распространение волны, отраженной от нижней поверхности, в среде с дефектом (замещением) на поверхности

7. Анализ прочих экспериментальных данных

На рисунке 27 эксперимент со случайными массами частиц, при этом отношение максимальной и минимальной не больше 10. Волны в этом случае очень неоднородны, хотя выполняются волновые явления. Такие волны быстро рассеиваются, что говорит о том, что для наблюдения за такой системой лучше не использовать отражённые волны. Так же возникнут трудности, если материал имеет большую толщину. На второй части рисунка представлена волна после отражения. Можно заметить, что фронт волны стал меньше по сравнению со своими начальными размерами.

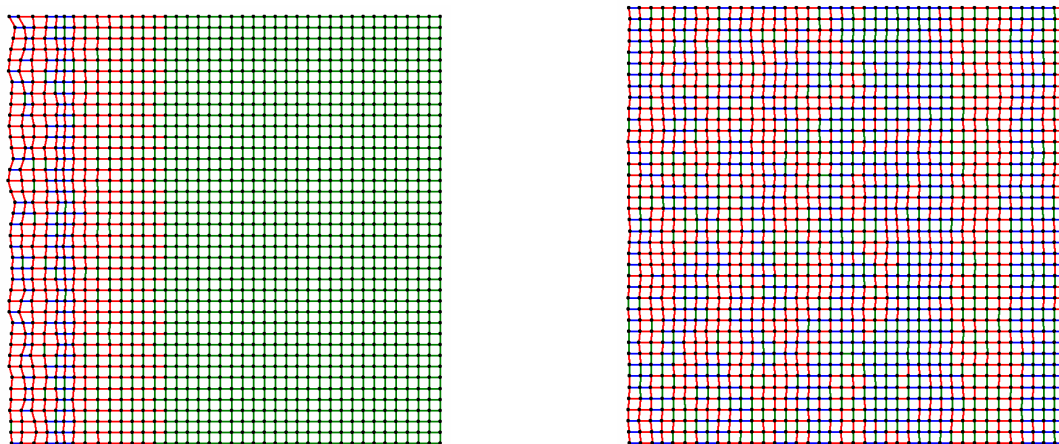


Рис.27 Волна в среде, где масса частиц случайна (максимальное соотношение масс 10 к 1)

В опыте, представленном на рисунке 28, каждый второй по горизонтали атом был утяжелён в два раза. В результате это привело к тому, что длины волн увеличились вдвое. Но в целом картина осталась той же. Также было отмечено, что если увеличить вдвое массу абсолютно всех частиц то картина будет, как если бы атомы имели неувеличенную массу. При этом волны распространяются медленнее.

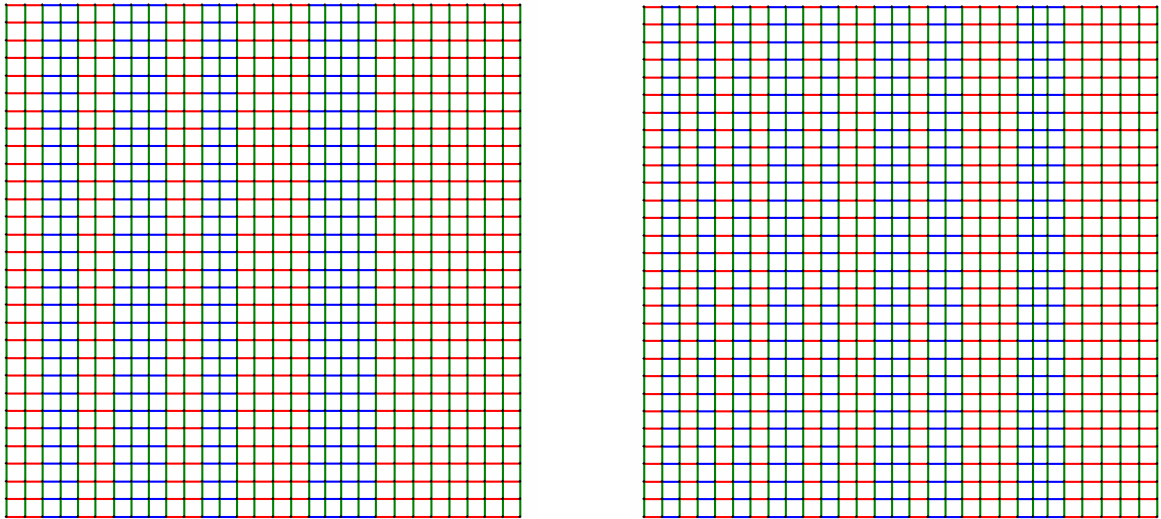


Рис.28 Увеличение длины волны в случае, когда масса атомов в каждом втором столбце увеличена

На рисунке 29 эксперимент, в котором в однородной сетке в 15 столбце были заменены все атомы на более тяжёлые. То есть внутри материала как – бы находится прослойка из более плотного материала. В результате столкновения волны с более плотной областью, часть волны отразилась обратно. На рисунке справа показаны два фронта (отраженной и возбуждённой волны), двигающиеся в разные стороны. Фронт отраженной волны, как видно на рисунке, меньше, чем фронт начальной волны, следовательно, обладает меньшей энергией. Если же продолжать увеличивать плотность прослойки то амплитуда отраженной волны будет расти, а амплитуда начальной волны после столкновения с прослойкой уменьшаться.

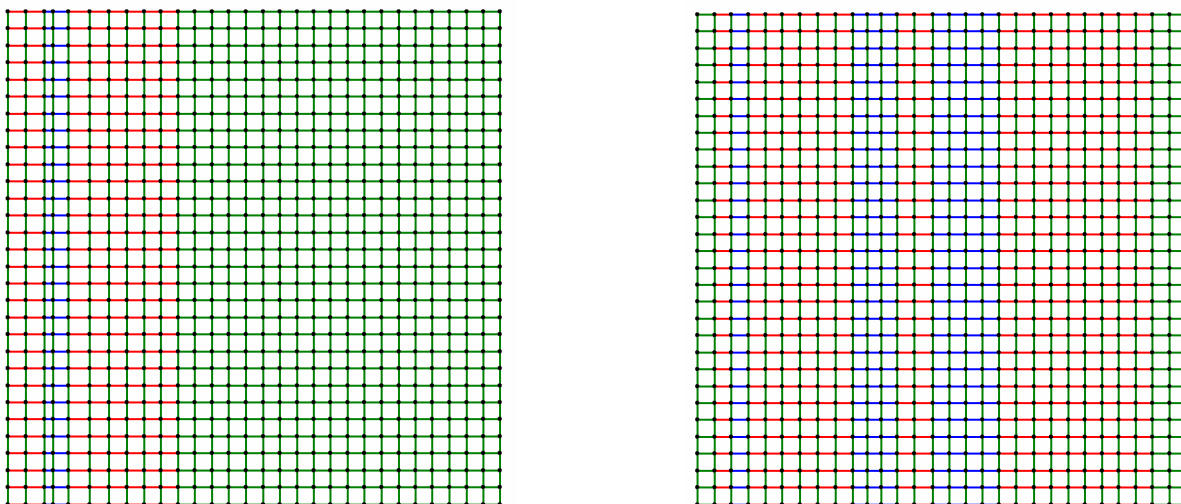


Рис.29 Частичное отражение волны от слоя с увеличенной массой частиц

В следующем эксперименте (рис.30) правая половина сетки атомов была утяжелена в несколько раз. Наблюдаемый эффект похож на переход световой волны из одной среды в другую: часть волны отразилась, часть прошла в более плотную среду. Скорость волны зависит от плотности среды (от масс частиц).

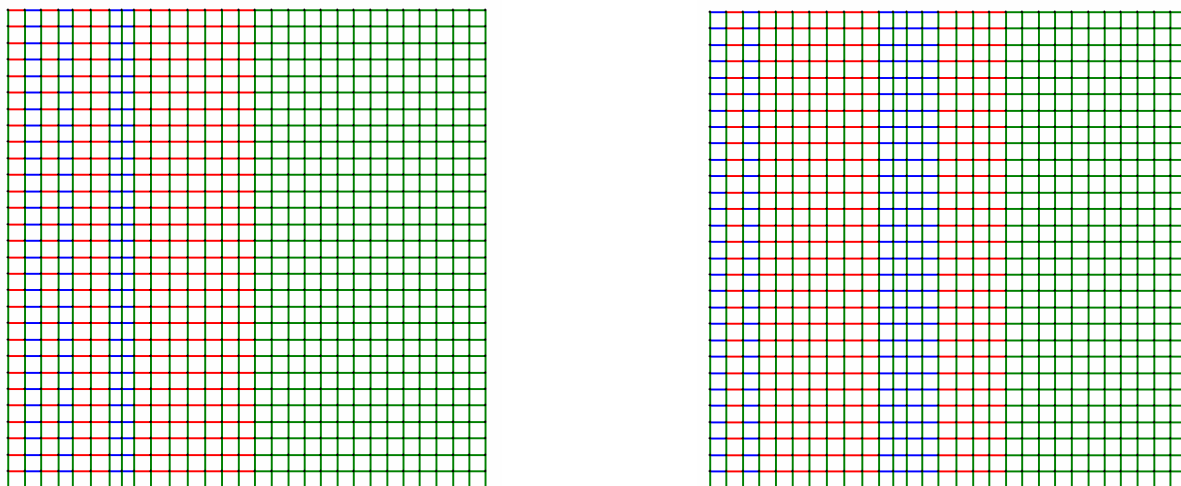


Рис.30 Частичное отражение волны от границы раздела двух сред

На рисунках 31,32 приведены данные из экспериментов доказывающих, что по волне, отраженной от дефекта, можно судить о геометрической форме и размерах дефекта. На рисунке 31 наблюдается отличие формы фронта и следующей за ним волны от их форм в случае, если дефект имеет более простую геометрическую форму.

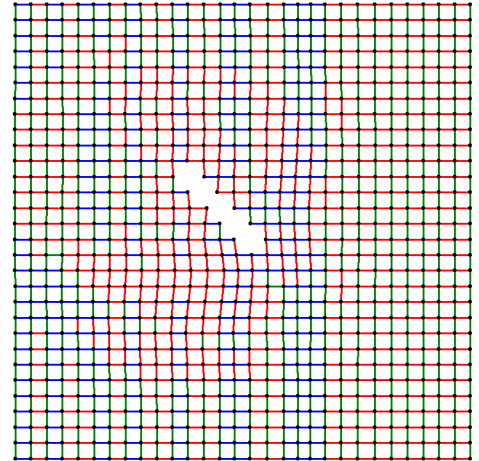
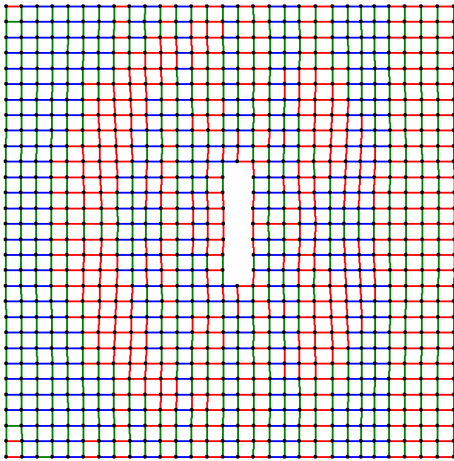


Рис.31 Изменение отраженных от дефекта волн при изменении формы дефекта

На рисунке 32 можно наблюдать, что фронт волны меняет радиус кривизны при изменении размеров дефекта.

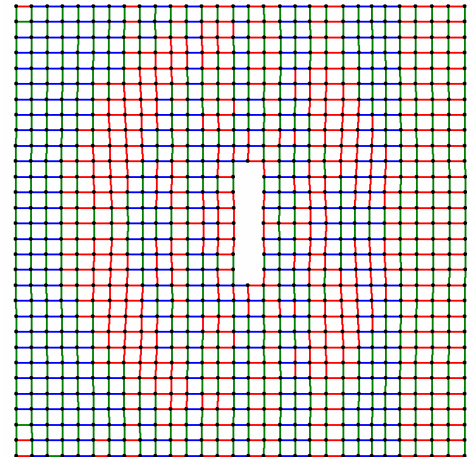
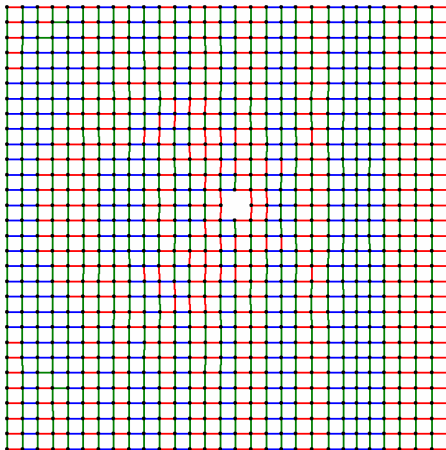


Рис.32 Изменения радиуса кривизны отраженной от дефекта волны при изменении размеров дефекта

В реальной же ситуации отраженная волна будет зависеть от формы и размеров дефекта намного сильнее, так как количество атомов на поверхности дефекта несоизмеримо с количеством атомов на поверхности дефекта в проводимых экспериментах.

8. Способы дефектоскопии (линейная дислокация)

Для того чтобы проанализировать дефекты типа дислокация в программу были внесены изменения. Частицы, находящиеся по краям дислокации, взаимодействуют так, будто они должны стоять рядом друг с

другом; из-за чего дислокация «стягивается». Это «стягивание» показано на рисунке 33.

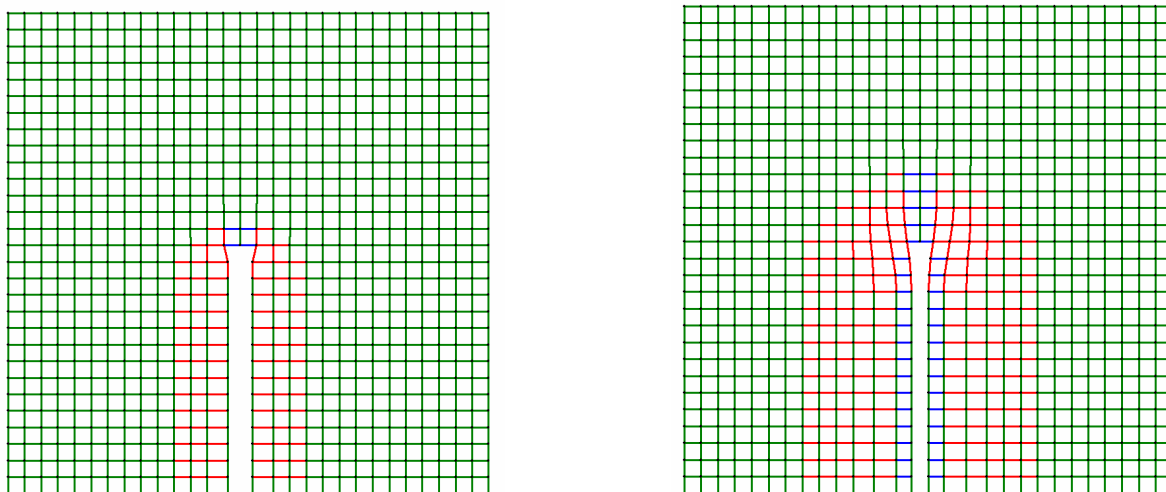


Рис.33 Образование дислокации

В предыдущих опытах для вакансий не учитывалось то, что частицы находящиеся по краям вакансий взаимодействуют т.к. это не влияло на качественную оценку экспериментальных данных. Для дислокаций же это взаимодействие является важной характеристикой.

В эксперименте (рис.34) пластинка имеет дислокацию, из-за чего уже является деформированной. В этой пластинке запускается волна. Достигая дефекта, волна частично отражается, как было показано в предыдущих экспериментах. На рисунке 34 об этом можно судить по количеству и толщине красных линий слева от дефекта. Наблюдаются явления нехарактерные для точечных дефектов.

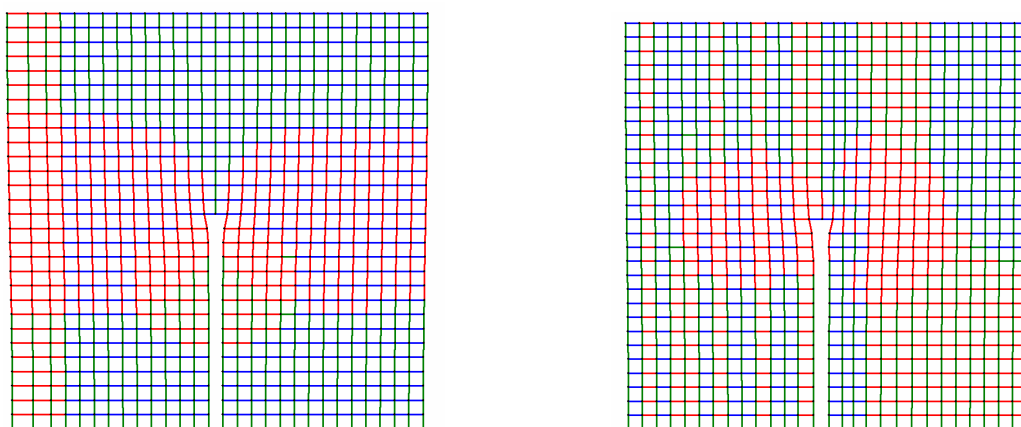


Рис.34 запуск волны в пластинке с дислокацией и отражение волн от неё

Волна, проходя через дислокацию, изменяет форму фронта (рис.35), поэтому время, за которое фронт достигнет правой границы, будет разным в разных точках поверхности. Отраженная волна также меняет форму фронта.

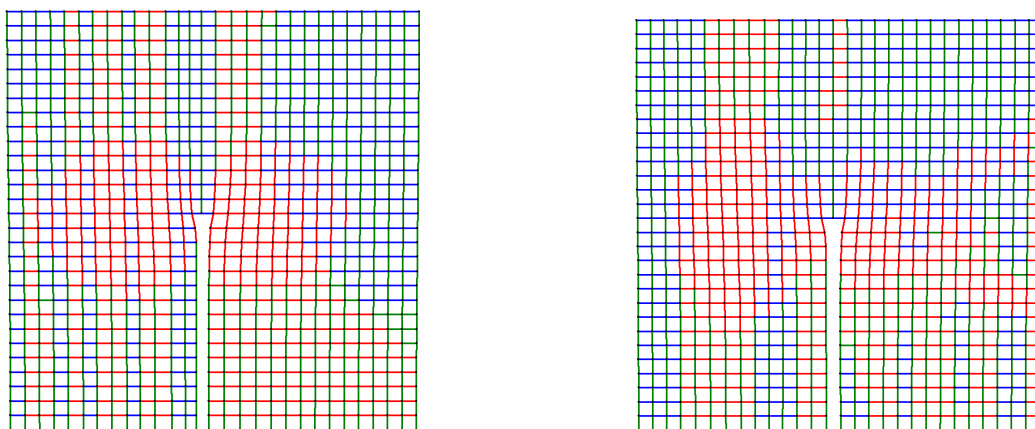


Рис.35 Изменение формы фронта волн (слева начальная, справа отраженная)

Важно заметить, что волна очень быстро теряет свою структуру и рассеивается.

9. Заключение

В данной работе была поставлена цель - разработать простую модель для качественной оценки распространения звуковых волн в среде с дефектами. Нам удалось достичь поставленной задачи: была создана программа для анализа звуковых волн, а также разработаны на её основе несложные способы обнаружения дефектов. Однако хотелось бы заметить, что работа является только началом и ещё осталось множество неразобранных вопросов, требующих больших затрат времени и техники. К ним можно отнести: более сложные дефекты (винтовые дислокации, внедрения и т.д.), приближение входных и выходных данных к реальным, добавление третьего измерения, усложнение уравнений описывающих взаимодействие частиц и т.д.

10. Список литературы

1. Беда П.И., Выборнов Б. И., Глазков Ю. А., Луцько С. П., Самойлович Г. С., Шелихов Г. С. Неразрушающий контроль металлов и изделий, справочник под редакцией Самойловича Г. С. 1973г.
2. Мякишев Г. Я. Физика: Механика 10 класс, профильный уровень, учебник для общеобразовательных учреждений под редакцией Г. Я. Мякишева, 11-е издание, дрофа
3. Мякишев Г. Я., Синяков А. З. Физика: Молекулярная физика, термодинамика 10 класс, учебник для углубленного изучения физики, 6-ое издание, дрофа
4. Мякишев Г. Я., Синяков А. З. Физика: Колебания и волны 11 класс, учебник для углубленного изучения физики, дрофа
5. wikipedia.org/wiki/Распределение_Максвелла
6. wikipedia.org/wiki/Волна
7. wikipedia.org/wiki/Дифракция
8. wikipedia.org/wiki/Интерференция
9. wikipedia.org/wiki/Внутреннее_отражение
10. www.physbook.ru/index.php/Слободянюк_А.И._Физика_10/19.2
11. elementy.ru/lib
12. physics-lectures.ru/mexanicheski-kolebaniya-i-volny
13. elementy.ru/news/430560
14. rusnauka.narod.ru/lib/phisic/destroy/glava6.htm
15. physbook.ru