

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет инженерно-физический  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы  
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика  
Направленность (профиль) образовательной программы – Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Зам. зав. кафедрой  
В.В. Соловьев  
« 15 » июня 2021 г

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Моделирование взаимодействия ультразвуковых волн и механической нагрузки в напряженно-деформированных конструкциях

Исполнитель  
студент группы 717-об

14.06.21  
(подпись, дата)

М.А. Казанцев

Руководитель  
доцент, канд. тех. наук

14.06.21  
(подпись, дата)

В.В. Соловьев

Консультанты:  
по БЖД  
канд. физ. - мат. наук

14.06.2021  
(подпись, дата)

В.Н. Аверьянов

Нормоконтроль  
ассистент кафедры СИТРК

14.06.2021  
(подпись, дата)

М.А. Аревкин

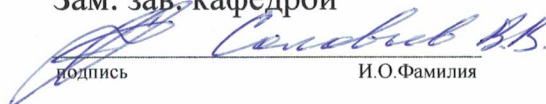
Благовещенск 2021

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Факультет инженерно – физический  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ

Зам. зав. кафедрой

  
подпись И.О.Фамилия

«26» апреля 2021 г.

### ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Казанцева Марка Александровича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Моделирование взаимодействия ультразвуковых волн и механической нагрузки в напряженно-деформированных конструкциях

учреждена приказом от 05.04.2021 № 658-уч

2. Срок сдачи студентом законченной работы 15.06.2021 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работы: комплект чертежей транспортно-установочного агрегата, документация по расчету внешних нагрузок транспортно-установочного агрегата

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): расчет НДС в металлических конструкциях и выявление самой нагруженной детали ТУА, обзор существующих методов расчёта дефектов металлов, моделирование ультразвуковых волн в детали ТУА, безопасность жизнедеятельности, экономическая часть

5. Перечень материалов приложения: титульный лист, блок – схема «Последовательность создание сетки платформы ТУА метод КЭ», статический анализ напряженно-деформированного состояния платформы ТУА, блок – схема «Методика проведения НК детали ТУА с воздушным зазором», эпюры распространения ультразвуковых скоростей в детали с воздушным зазором, сокращенная

блок-схема «Методика проведения НК детали ТУА без зазора», эпюры распространения ультразвуковых скоростей в детали без воздушного зазора, график «Изменение скорости поперечных волн от приложенной нагрузки», заключение

6. Консультант по БЖД: Аверьянов В.Н., канд. физ. – мат. наук

7. Дата выдачи задания 26.04.2021 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы: Соловьев В.В., доцент, канд. тех. наук

Задание принял к исполнению (дата) 26.04.2021 Иванов

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 72 с., 37 рисунков, 8 таблиц, 13 источников

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ДЕФЕКТ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, НАГРУЗКА, УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ, ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНЫЙ АГРЕГАТ МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, НАПРЯЖЕНИЕ, АКУСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Ультразвуковой контроль является одним из основных акустических методов неразрушающего контроля. Неразрушающий контроль – диагностика объекта с сохранением его целостности и работоспособности. Перед проведением неразрушающего контроля нужно исследовать напряженно-деформированное состояние объекта. После чего выявляются самые опасные детали, по которым создаются акустические модели для дальнейшего исследования и моделирование в моделях распространения ультразвуковых волн. Благодаря этому происходит накопление базы данных сигналов, а также возможность анализа выбора мест установки датчиков.

Цель работы: проведение оценки напряженно-деформированного состояния транспортно-установочного агрегата, а также моделирование неразрушающего контроля в самой нагруженной детали ТУА для выявления дефектов.

Задачи работы:

- рассмотреть напряженно-деформированного состояния транспортно-установочного агрегата, а также выявить самую опасную деталь;
- провести моделирование ультразвуковой волны в детали ТУА с помощью датчиков с зазором между объектом и без зазора, и рассчитать погрешность определения координат дефекта;

- дать оценку напряженно-деформированного состояния транспортно-установочного агрегата при помощи метода акустоупругости;
- провести расчет затрат на проведение напряженно-деформированного состояния транспортно-установочного агрегата и моделирование неразрушающего контроля.

## СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	8
Введение	9
1 Расчет НДС в металлических конструкциях и выявление самой нагруженной детали ТУА	11
1.1 НДС в металлических конструкциях	11
1.1.1 Механическая нагрузка	11
1.1.2 Напряжения в металлических конструкциях	14
1.1.3 Метод предельных состояний	16
1.1.4 Характеристики прочности	17
1.2 Численный анализ прочности металлоконструкции	19
1.2.1 Постановка задачи теории упругости	19
1.2.2 Метод конечных элементов	21
1.3 Расчет НДС ТУА	24
2 Обзор существующих методов расчёта дефектов металлов	29
2.1 Общие сведения об ультразвуке	30
2.2 Ультразвуковой контроль	32
2.3 Моделирование распространения акустических волн методом конечных элементов (МКЭ)	35
2.3.1 САПР COSMOS/M (Линейная модель)	36
2.3.2 САПР COSMOS/M (Плоская модель)	37
2.3.3 САПР COSMOS/M (Пластина с трещиной)	38
2.3.4 COMSOL Multiphysics	40
2.3.5 САПР COMSOL FEMLAB	41
2.4 Моделирование распространения ультразвука методом конечных разностей во временной области	46

2.4.1	Описания алгоритма расчета	46
2.4.2	Применение двуслойной схемы КРВО	48
3	Моделирование ультразвуковых волн в детали ТУА	51
3.1	Эхометод	51
3.2	Методика проведения НК детали ТУА с воздушным зазором и анализ результатов	52
3.3	Методика проведения НК детали ТУА без зазора и анализ результатов	56
3.4	Расчет погрешностей координат дефекта	59
3.5	Оценка НДС при помощи метода акустоупругости	61
4	Требования безопасности при работе с ультразвуком	63
4.1	Источники, классификация и характеристика ультразвука	63
4.2	Нормирование ультразвука	63
4.3	Методы измерения и контроля ультразвука на рабочих местах	64
4.4	Методы защиты от ультразвука	65
5	Экономическая часть	66
	Заключение	70
	Библиографический список	71

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

ТУА – транспортно установочный агрегат;

МКЭ – метод конечных элементов;

УЗК – ультразвуковой контроль;

ПС – предельное состояние;

НДС – напряженно-деформируемое состояние;

МДТТ – механика деформируемого твердого тела;

РКН – ракета космического назначения;

ПУ – пусковое устройство;

САПР – системы автоматизированного проектирования;

КРВО – конечные разности во временной области;

СК – стартовый комплекс;

КЭ – конечные элементы;

ПО – программное обеспечение;

НК – неразрушающий контроль;

ОК – объект контроля;

ДУ – дифференциальное уравнение;

ПК – персональный компьютер.



## ВВЕДЕНИЕ

ТУА предназначено для транспортировки, установки (снятия) РКН на ПУ.

ТУА состоит из: стрелы с откидной консолью; платформы на тележках; нижней и средней опор; крыльев; механизма подвески; сменного оборудования; двух механизмов доводки; гидроцилиндра; блока гидроаппаратуры; гидропривода, который состоит из двух насосных установок; электрооборудования; двух гидроопор.

С помощью *гидроцилиндра* производится подъём стрелы в вертикальное положение.

*Гидроопоры*, которые установлены на крыльях, обеспечивают устойчивость ТУА. На стреле ТУА установлены механизм подвески, средняя, верхняя и нижняя опоры.

На платформе ТУА установлены насосные установки, гидроцилиндр, а также стрела. Для надежного закрепления изделия в процессе транспортировки и установки РКН используется механизм подвески, верхняя, нижняя и средняя опора.

*Стрела* нужна для крепления на ней ракеты космического назначения при подъёме в вертикальное положение, при транспортировке и установке на агрегат.

*Платформа* транспортно-установочного агрегата фиксируется к кронштейнам на СК двумя механизмами доводки, перед подъёмом стрелы в вертикальное положение, с помощью которых можно перемещать в продольном направлении ТУА, вывешенный на гидроопорах, в пределах  $\pm 50$  мм.

Для оценки технического состояния платформу ТУА надо проводить анализ НДС с целью выявления опасных участков. А также проводить моделирование распространения ультразвуковой волны с целью выявления дефектов и оптимального расположения регистрирующих датчиков. С помощью модели-

рования происходит накопления базы данных сигналов от искусственно созданных дефектов, что в дальнейшем упрощает работу оператору.

Цель работы: проведение оценки напряженно-деформированного состояния транспортно-установочного агрегата, а также моделирование неразрушающего контроля в самой нагруженной детали ТУА для выявления дефектов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть напряженно-деформированного состояния транспортно-установочного агрегата, а также выявить самую опасную деталь;
- провести моделирование ультразвуковой волны в детали ТУА с помощью датчиков (с зазором между объектом и без зазора), и рассчитать погрешность определения координат дефекта;
- дать оценку напряженно-деформированного состояния транспортно-установочного агрегата при помощи метода акустоупругости.

# 1 РАСЧЕТ НДС В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ И ВЫЯВЛЕНИЕ САМОЙ НАГРУЖЕННОЙ ДЕТАЛИ ТУА

Совокупность напряжений и деформаций, возникающих при действии на твердое деформируемое тело внешних нагрузок, температурных полей и других факторов, называется напряженно-деформированным состоянием (НДС).

Чтобы дать оценку надежности и технического состояния металлоконструкций, а также стальных изделий, которые находятся в процессе производственной эксплуатации, нужно оценить напряженно-деформированного состояния (НДС) металла. Благодаря этим данным происходит обнаружение дефектных участков, далее устанавливается степень опасности разрушения и с помощью технических средств, которые основаны на разных физических методах (акустические, электромагнитные, магнитные и т.д.), осуществляется контроль напряженно-деформированного состояния конструкции.

Металлоконструкции должны соответствовать эксплуатационным требованиям исходя из назначения: обладать прочностью и устойчивостью, т.е. несущей способностью, иметь хорошую надежность и жесткость.

Надежность металлической конструкции является фактором, который определяет надежность и долговечность в целом, поэтому при расчете и проектировании необходимо уделять особое внимание совершенствованию конструктивных форм и методов расчета металлоконструкций, обеспечению надежности и долговечности при одновременном учете экономии металла.

## **1.1 НДС в металлических конструкциях**

### **1.1.1 Механическая нагрузка**

Силовые воздействия, который вызывают изменения НДС конструкций, материалов, частей сооружения, машин и т.п., называется механической нагрузкой.

Нагрузки в зависимости от места приложения и характера, времени действия могут быть классифицированы по следующим признакам:

- характеру действия;
- виду действия;
- месту действия.

По первому признаку (характера действия во времени) бывают нагрузки статические и динамические. Статические нагрузки очень медленно изменяются во времени, поэтому ускорениями металлической конструкции и отдельных ее узлов, которые появляются от действия этих нагрузок, можно пренебречь. При действии статической нагрузки колебания металлической конструкции или совсем не возникают, или незначительны (в случаи, когда вес элементов расположенных на металлической конструкции).

Из-за того что динамические нагрузки очень быстро воздействуют, металлические конструкции начинают колебаться, так как они получают ускорения. Динамические нагрузки появляются при остановках привода и его пусках, ударах механизмов и металлоконструкций. Когда происходит определение динамических нагрузок важно учесть силы инерции от самой металлоконструкции и от расположенных на ней узлов.

По виду действия различают постоянные и временные нагрузки.

Собственный вес металлической конструкции можно отнести к постоянной нагрузки. В течение всего периода эксплуатации металлической конструкции собственный вес действует непрерывно. В свою очередь временные нагрузки появляются, когда поднимаем груз (сила тяжести) или от внешней нагрузки.

По месту действия различают сосредоточенные нагрузки и распределенные. Нагрузка любого вида действует на площадку, но если площадка мала по сравнению с размерами самой металлической конструкции, можно сделать вывод, что нагрузка будет передаваться через центр тяжести этой площадки, т.е. нагрузка сосредоточенная. Если размеры площадки соизмеримы с размерами металлической конструкции, то нагрузка распределенная.

В процессе выполнения технологических операций возникают нагрузки, которые называются технологическими.

Технологические нагрузки являются главными, т.е. доминирующими и вызывают самые большие напряжения по сравнению с другими нагрузками (нагрузка от массы поднимаемого и перемещаемого груза).

Собственный вес является вертикальной статической нагрузкой.

Вес снега или обледенения верхней поверхности ТУА, находящегося в транспортном положении без изделия, по оценке не превысит 1500 кгс. Так как вес снега или обледенения значительно меньше веса изделия, он не вызовет нагрузки на опорные элементы ТУА, большие, чем изделие, и поэтому в расчете не учитывается.

$$s = s_0 \cdot \mu, \quad (1)$$

где  $s_0$  – нормативное значение веса снегового покрова на 1 м<sup>2</sup> горизонтальной поверхности земли.;

$\mu$  – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие.

Инерционные нагрузки – нагрузки, которые возникают при пуске и остановке узлов конструкции вследствие толчков при движении по неровным поверхностям (нагрузки на поднимаемую систему при подъеме, собственные моменты инерции изделий при их повороте в процессе подъема).

Давление ветра, зависящее от скоростного напора движущегося воздуха (ветра) и конфигурации воспринимающей поверхности конструкций и груза.

$$W = K_n \cdot \beta_0 \cdot q \cdot C \cdot F, \quad (2)$$

где  $K_n$  – коэффициент увеличения ветрового давления по высоте;

$\beta_0$  – динамический коэффициент ветровой нагрузки;

$q$  – скоростной напор ветра;

$C$  и  $F$  – аэродинамические коэффициенты.

### 1.1.2 Напряжения в металлических конструкциях

Алгебраическая сумма проекций векторов внутренних физических деформаций направления, называется продольной и поперечной деформацией. Также эти деформации можно измерить.

Для материала существует энергетический параметр, который складывается из силовых характеристик, а также деформационных. Они показывают разные способы изменения внутренней энергии. Этот параметр называется внутренним напряжением.

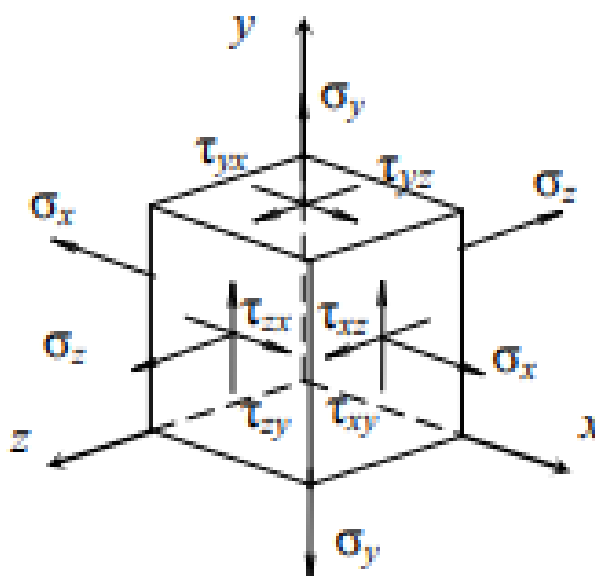


Рисунок 1 – Напряженно-деформируемое состояние в бесконечно малом параллелепипеде [5]

Напряжения могут классифицироваться в зависимости от вида на основные, дополнительные, местные и начальные.

*Основные напряжения* – это напряжения, которые определяются от внешних нагрузок. По данным видам напряжений можно судить о надежности конструкции. Также основные напряжения определяют несущую способность элементов конструкции и с помощью этих внутренних усилий уравнивают внешние воздействия.

*Дополнительные напряжения* – это напряжения, которые возникают в результате дополнительных связей по отношению к принятой идеализированной

расчетной схеме (например, из-за жесткости узлов, дополнительных систем связей и т. п.). Дополнительные напряжения, которые определяются методами строительной механики, при пластичном материале не оказывают существенного влияния на несущую способность конструкции.

Местные напряжения могут быть двух видов:

- в результате внешних воздействий;
- в местах резкого изменения или нарушения сплошности сечения, где вследствие искажения силового потока происходит концентрация напряжений.

Местные напряжения в результате внешних воздействий уравниваются с внешними воздействиями, местные напряжения в местах резкого изменения – уравниваются внутренне. К местным напряжениям, которые возникают из-за внешних нагрузок, относятся напряжения в местах приложения сосредоточенных нагрузок – на опорах, в местах опирания каких-либо других конструкций.

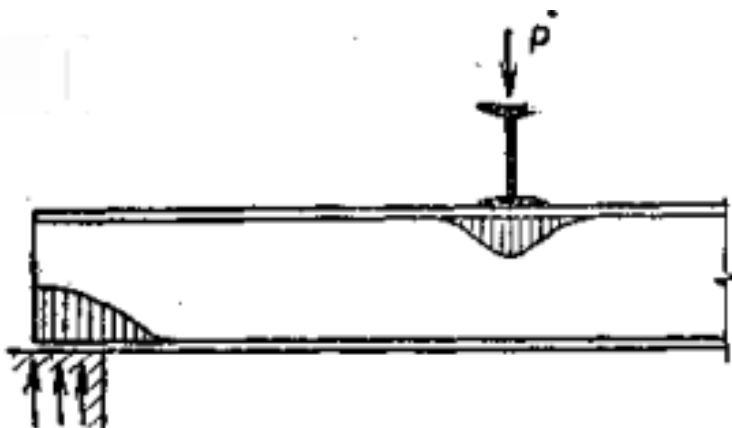


Рисунок 2 – Местные напряжения [5]

Внутренние усилия, которые присутствуют на металлической конструкции, когда не прикладываются нагрузки или различного рода воздействия, называется начальным напряжением.

По другому начальные напряжения иногда называют остаточными, внутренними, а также собственными, потому что они могут возникать в результате предыдущей эксплуатации и пластической деформации металлоконструкции.

Также они могут появляться при неравномерном остывания после прокатки и сварки.

### 1.1.3 Метод предельных состояний

По предельным состояниям можно определить НДС металлоконструкции, рассчитав силовые и другие воздействия.

Предельное состояние (ПС) – это такое состояние, когда конструкция не может удовлетворять требованиям, которые предъявляются к ней в процессе эксплуатации, а также монтажа. Предельные состояния можно подразделить на две группы.

К первой группе ПС входят предельные состояния, при наступлении которых, становится невозможным эксплуатировать металлоконструкции из-за их непригодности. К первой группе ПС относятся разрушения разного вида, потеря общей устойчивости металлоконструкции или потеря местной устойчивости отдельного элемента металлической конструкции, нарушения узлов и соединений, которые превращают конструкцию в геометрически изменяемую систему. Расчет по несущей способности (по предельным состояниям I группы) обязателен для всех несущих конструкций, элементов и их соединений. Расчет по предельным состояниям I группы производится на воздействие самых больших нагрузок, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации (расчетных нагрузок). При этом максимально возможное усилие в элементе или в конструкции не должно превышать минимальной несущей способности элемента или металлоконструкции

$$N \leq S, \tag{3}$$

где  $N$  – максимальное усилие, которая зависит от нагрузок и расчетной схемы;

$S$  – минимальная несущая способность, которая зависит от материала и геометрических параметров сечения.

Во вторую группу предельных состояний входят предельные состояния, при которых конструкция становится непригодна к нормальной эксплуатации



по деформациям и перемещениям, то есть по непригодности. К ним относятся превышающие нормы прогибы, перемещения и повороты узлов, осадки опор, колебания.

Расчет по ПС II группы (расчет по деформациям) производится в основном для изгибаемых элементов (определяется прогиб). Расчет по деформациям производится на действие нормативных нагрузок. При этом фактическая деформация не должна превышать нормируемой величины деформации:

$$f \leq f_u, \quad (4)$$

где  $f$  – фактическая деформация;

$f_u$  – нормируемая величина деформации, задаваемая в СП 20.13330–2016 «Нагрузки и воздействия».

#### 1.1.4 Характеристики прочности

Нормативное сопротивление является основной прочностной характеристикой стали. Для элементов, которые работают на сжатие, растяжение и изгиб, нормы можно рассмотреть две величины нормативного сопротивления:

– нормативное сопротивление по пределу текучести  $R_{yn}$  (определяется по пределу текучести образцов  $\sigma_y$ );

– временное сопротивление или нормативное сопротивление по пределу прочности  $R_{un}$  (определяется по временному сопротивлению образцов  $\sigma_u$ ).

Эти величины получаются в результате проведения статистической обработки данных экспериментальных испытаний образцов материала. Почти всегда нормативное значение сопротивления должно быть с обеспеченностью 0,95, то есть из 100 испытываемых образцов минимум 95, имеющие сопротивление не меньше принятого. Так как работа образцов под внешним воздействием в лаборатории отличается от работы реальных металлоконструкций по различным причинам, поэтому расчет надо производить по расчетным сопротивлениям, которых также выделяют два:

– расчетное сопротивление по пределу текучести  $R_y$ ;

– расчетное сопротивление по пределу прочности  $R_u$ .

Чтобы определить усилие  $N$  нужно знать значение расчетных нагрузок  $F_i$ , которые представляют собой самые большие, а также внешние воздействия, которые чаще повторяются.

$$N = \sum F_i^n \cdot \gamma_f \cdot \gamma_n. \quad (5)$$

где  $F_i^n$  – нормативная нагрузка, которая также берет во внимание требования допустимой эксплуатации;

$\gamma_f$  – коэффициент надежности по нагрузке;

$\gamma_n$  – коэффициент надежности по назначению, который учитывает степень ответственности металлоконструкций.

При одновременном действии двух или нескольких временных нагрузок расчет металлоконструкций по первой и второй группам предельных состояний выполняется с учетом наиболее неблагоприятных сочетаний нагрузок или усилий.

Вероятность совместного действия нескольких нагрузок учитывают умножением нагрузок или вызываемых ими усилий на коэффициент сочетаний  $\psi$ .

Расчетные сопротивления определяются путем деления нормативных сопротивлений на коэффициент надежности по материалу:

$$R_y = \frac{R_{yn}}{\gamma_m}, \quad (6)$$

$$R_u = \frac{R_{un}}{\gamma_m}, \quad (7)$$

где  $\gamma_m$  – коэффициент надежности по материалу.

Несущая способность – это предельное усилие  $S$ , воспринимаемое рассчитываемый элемент. Определяется произведением геометрической характеристики сечения  $A$  (площади) на расчетное сопротивление  $R_y$  и коэффициент условий работы  $\gamma_c$ .

Тогда уравнение (3) примет вид

$$\sum F_i^n \cdot \gamma_f \cdot \gamma_n \cdot \psi \leq A \cdot \frac{R_y^n \cdot \gamma_c}{\gamma_m}, \quad (8)$$

$$\sum F_i^n \cdot \gamma_f \cdot \gamma_n \cdot \psi \leq A \cdot \frac{R_u^n \cdot \gamma_c}{\gamma_m \cdot \gamma_b}, \quad (9)$$

где  $\gamma_b$  – коэффициент надежности для элементов конструкций, который рассчитывается по временному сопротивлению.

## 1.2 Численный анализ прочности металлоконструкции

### 1.2.1 Постановка задачи теории упругости

Краевой задачей механики деформируемого твердого тела является определение напряженно-деформируемого состояния металлической конструкции. Для ее решения все сводится к решению системы уравнений, которая состоит из ДУ равновесия (уравнений Навье), геометрических соотношений (уравнений Коши, которые устанавливают связь между перемещениями и деформациями, и уравнений совместности деформаций Сен-Венана), физических уравнений (определяющих связь между напряжениями и деформациями), при заданных граничных условиях.

– уравнения равновесия Навье:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z = 0. \quad (12)$$

– уравнения Коши:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}, \varepsilon_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}, \varepsilon_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right), \varepsilon_{23} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right), \varepsilon_{31} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right). \quad (14)$$

– уравнения совместности деформаций Сен-Венана:

$$\begin{aligned} 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{12}}{\partial x_1 \partial x_2} &= \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x_1^2}, \\ 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{13}}{\partial x_1 \partial x_3} &= \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_3^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{33}}{\partial x_1^2}, \\ 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{23}}{\partial x_2 \partial x_3} &= \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x_3^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{33}}{\partial x_2^2}, \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{11}}{\partial x_2 \partial x_3} &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left( -\frac{\partial \varepsilon_{23}}{\partial x_1} + \frac{\partial \varepsilon_{13}}{\partial x_2} + \frac{\partial \varepsilon_{12}}{\partial x_3} \right), \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{22}}{\partial x_1 \partial x_3} &= \frac{\partial}{\partial x_2} \left( -\frac{\partial \varepsilon_{31}}{\partial x_2} + \frac{\partial \varepsilon_{23}}{\partial x_1} + \frac{\partial \varepsilon_{12}}{\partial x_3} \right), \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{33}}{\partial x_1 \partial x_2} &= \frac{\partial}{\partial x_3} \left( -\frac{\partial \varepsilon_{12}}{\partial x_3} + \frac{\partial \varepsilon_{23}}{\partial x_1} + \frac{\partial \varepsilon_{13}}{\partial x_2} \right). \end{aligned}$$

Рисунок 3 – Уравнения совместности деформаций Сен-Венана [8]

где  $\sigma_i, \tau_{ij}$  – компоненты тензора напряжений (нормальные и касательные напряжения);

$X, Y, Z$  – проекции компонента вектора объёмных сил на соответствующие оси;

$\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора деформаций;

$u_i$  – компоненты тензора перемещений.

Также необходимо добавить такие физические уравнения, вид которых определяется используемыми мат. моделями, которые строятся на основании экспериментального исследования физико-механических свойств материалов металлической конструкции. В общем виде выглядит так:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (15)$$

где  $E$  – модуль упругости

Почти все материалы металлических конструкций подчиняются закону Гука при малых деформациях. При анализе напряженно-деформируемого состояния металлической конструкции используется линейно-упругую модель, благодаря которой не снижается точность результатов и значительно уменьшается трудоемкость и время проведения расчетов.

Соответственно, интегрирование уравнения (15) с учетом граничных условий (уравнений Сен-Венана) позволит определить все параметры линейно-упругого напряженно-деформируемого состояния металлической конструкции.

### 1.2.2 Метод конечных элементов

Одним из самых известных на данный момент методов численного решения задач механики деформируемого твердого тела – метод КЭ.

Главным достоинством использования метода КЭ при численном анализе металлических конструкций являются то, что можно использовать нерегулярные расчетные сетки. С помощью этих сеток легко моделируются тела очень сложной геометрии с требуемой точностью. Также сходимость метод КЭ теоретически доказана эллиптических задач

Только метод КЭ можно использовать для неоднородных металлических конструкций, которые состоят из элементов отличающиеся свойствами материалов

Одним из недостатков метода КЭ – это то, что нужно использовать большую (по сравнению с методом КРВО) производительность электронно-вычислительной машины, чтобы достичь заданной точности приближенного решения.

Суть метода КЭ. Аппроксимировать моделью можно любую непрерывную величину, например, перемещение, если разбить заданную область на КЭ.

Чтобы определить перемещения в местах стыках КЭ, нужно задать внутри каждого элемента металлической конструкции функцию формы.

Узловые перемещения берутся за неизвестные коэффициенты. Потом с учетом этих коэффициентов записывается функционал энергии для всех элементов (всей изучаемой области), в результате минимизации которого получается система алгебраических уравнений, решение которой и есть приближенное решение исходной задачи.

Минимум функционала должен быть реализован в классе функций, которые удовлетворяют краевым условиям на той части контура, на которой заданы перемещения.

В случае решения геометрически нелинейных плоских механики сплошных твердых тел исследуемый объект, как правило, разбивается на множество плоских криволинейных элементов в виде треугольников или четырехугольников и тогда матрица таких элементов будет значительно проще, чем матрица криволинейных объемных элементов.

При построении дискретной модели перемещения (непрерывной величины) алгоритм расчета следующий:

1. Область определения непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами. КЭ имеют общие узловые точки и в совокупности аппроксимируют форму области.

2. В рассматриваемой области фиксируется конечное число узловых точек.

3. Значение непрерывной величины в каждом узле первоначально считается известным, но следует учитывать, что эти значения нужно будет еще определить путем наложения на них дополнительных ограничений, исходя от физической сущности задачи.

4. Далее используются значения нашей непрерывной величины в узловых точках и ту или иную аппроксимирующую функцию, определяют значение исследуемой величины внутри области.

Расчет металлической конструкции на прочность при помощи метода КЭ включает следующие этапы:

1. Построение геометрической модели и ее разбиение на КЭ. Определение действующих нагрузок и граничных условий. Формирование конечно-элементной модели.

2. Расчет для каждого КЭ матрицы жесткости и вектора приведенной к узлам внешней нагрузки.

3. Составление разрешающей системы линейных уравнений.

4. Решение полученной системы, определение перемещений, деформаций, напряжений.

5. Оценка прочности конструкции.

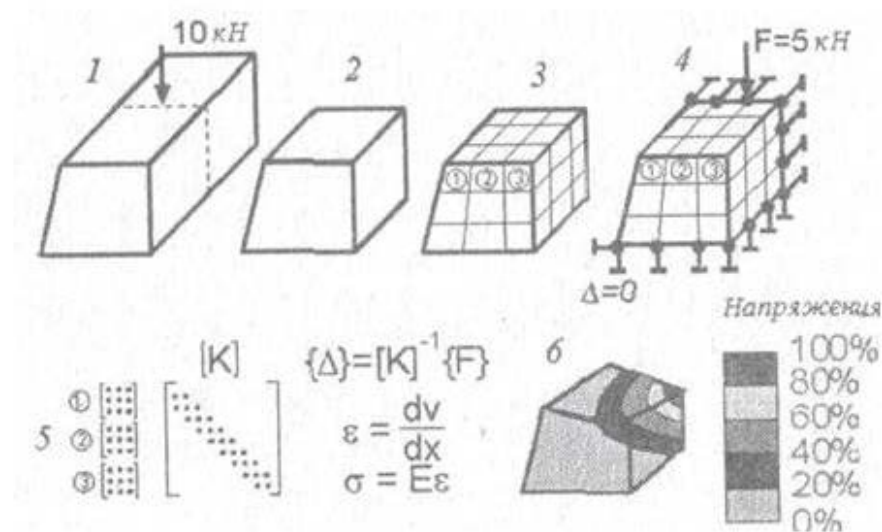


Рисунок 4 – Этапы решения задач с применением МКЭ [12]

1) проектирование 3д модели и внешних усилий; 2) создание такой модели, которая будет пригодна для метода КЭ; 3) разбиение модели на сетку КЭ; 4) приложение к модели нагрузки, а также установки закрепления; 5) численное решение системы уравнений; 6) анализ результатов.

### 1.3 Расчет НДС ТУА

Схема внешних нагрузок, действующих на платформу ТУА, показана на рисунке 1. На схеме приняты следующие их обозначения:

$W_n, W_6$  – продольная и боковая ветровые нагрузки;

$A_x, A_y, A_z$  – нагрузки на ось поворота стрелы;

$J'_y, J''_y, J_x$  – усилие от одной гидроопоры;

$2C = G_{21}$  – вес двух крыльев с площадками;

$R_{ПТ}$  и  $R_{ЗТ}$  – опорные реакции передней и задней тележек;

$B_x$  и  $B_y$  – нагрузки на шарнир гидродомкрата;

$D = G_{15}$  – часть веса гидродомкрата, приходящаяся на раму;

$T = G_{27}$  – вес ЗИП;

$K = G_{23}$  – вес шкафа электрооборудования;

$F = G_{26}$  – вес распределенного по раме оборудования;

$N = G_{14}$  – вес раму платформы с контргрузом;

$2L = G_{24}$  – вес двух механизмов доводки;

$M$  – усилие в стяжке механизмов доводки;

$2E = G_{16}$  – вес насосных установок, расположенных на двух площадках;

$H$  – часть веса поднимаемой системы, приходящаяся на опоры стрелы при транспортировке.

На рисунке 5 направление нагрузок соответствуют их принятым положительным величинам.

Так как при подъёме возникают максимальные нагрузки, которые действуют на раму ТУА. Поэтому если платформа выдержит эти усилия, то она и выдержит другие нагрузки при различных расчетных случаях нагружения.



Таблица 1 – Весовые нагрузки на платформу от закрепленного на ней оборудования

в килограмм – силе

2С	D	2E	F	K	2L	N	T	2J'' <sub>y</sub>
4075	4292	4000	1242	500	500	46125	700	2800

Таблица 2 – Весовые нагрузки от поднимаемой системы

в килограмм – силе

$2A_x$	$2A_y$	$B_x$	$B_y$
192305	-102112	335784	192305

Таблица 3 – Инерционные нагрузки от поднимаемой системы

в килограмм – силе

Продольные нагрузки		Вертикальные нагрузки	
$2A_x$	$2A_y$	$B_x$	$B_y$
21092	9943	21576	12357

Таблица 4 – Ветровые нагрузки на поднимаемую систему

в килограмм – силе

Боковой ветер			Продольный ветер спереди/сзади			
$A_{1x}, A_{2x}$	$A_{1y}, A_{2y}$	$2A_z$	$2A_x$	$2A_y$	$B_x$	$B_y$
$\pm 26121$ $\pm 16175$	$\pm 5674$	2789	$\frac{28}{77}$	$\frac{343}{-101}$	$\frac{598}{-177}$	$\frac{343}{-101}$

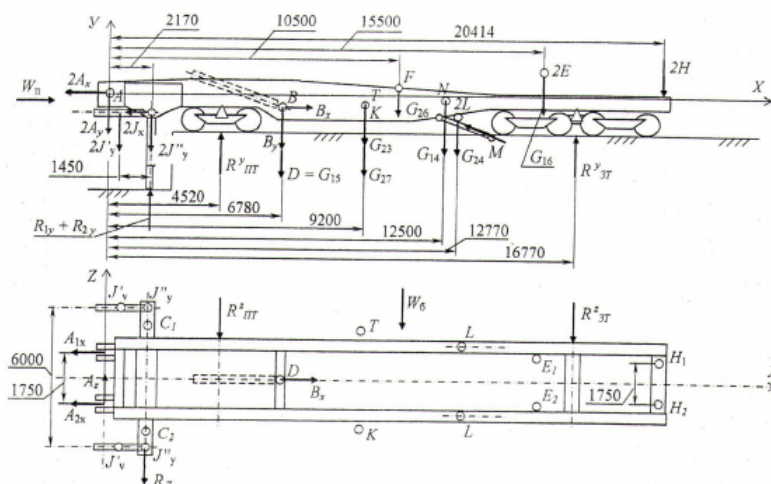


Рисунок 5 – Схема внешних нагрузок на железнодорожную платформу

ТУА

Последовательность создание сетки ТУА методом КЭ:

1. Создание 3d модели платформы ТУА в САПР Solid Works;
2. Выбор статического анализа расчета (исследовать напряжения, смещения, нагрузки и запас прочности для компонентов с линейным материалом);
3. Приложение к модели нагрузки, а также установки закрепления
4. Задание материалов конструкции;
5. Устанавливаем тип соединения контактов компонент;
6. Создание сетки МКЭ (рисунок 10).

Далее запускаем статическое исследование и проводим анализ результатов (рисунок 6-9).

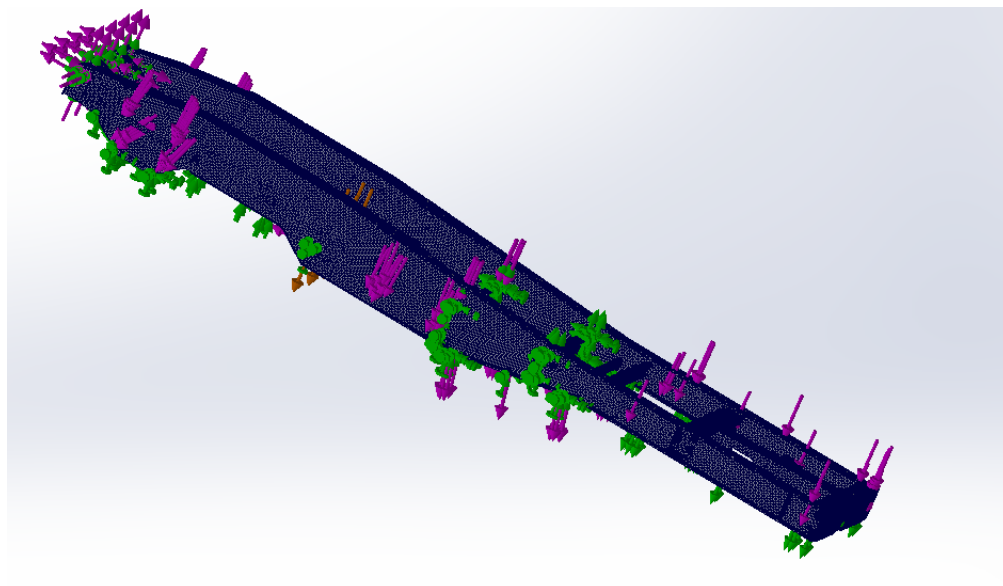


Рисунок 6 – Создание сетки платформы ТУА

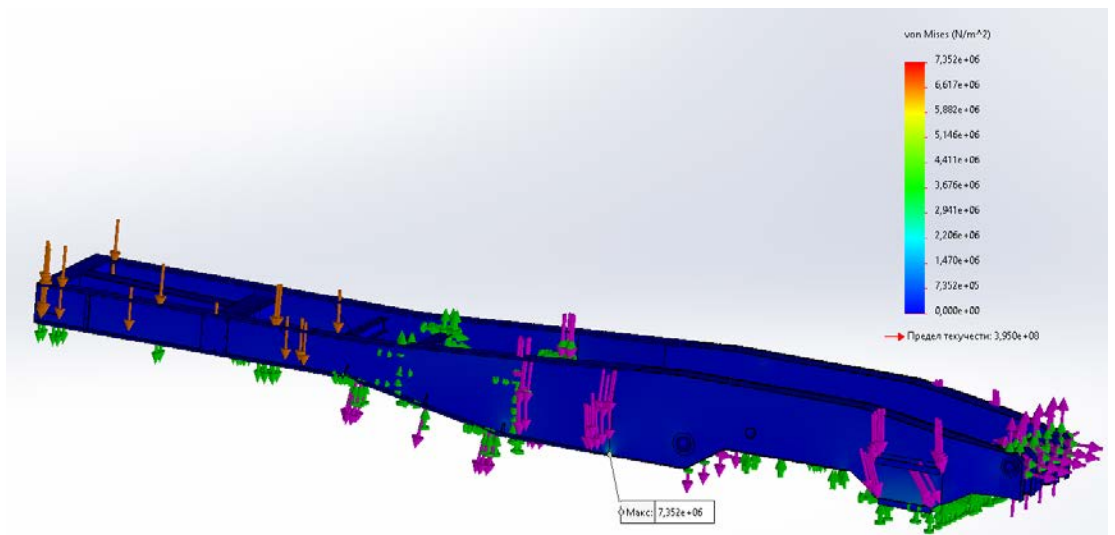


Рисунок 7 – Эпюра напряжений металлической конструкции

Максимальное напряжение составило 7,352 МПа.

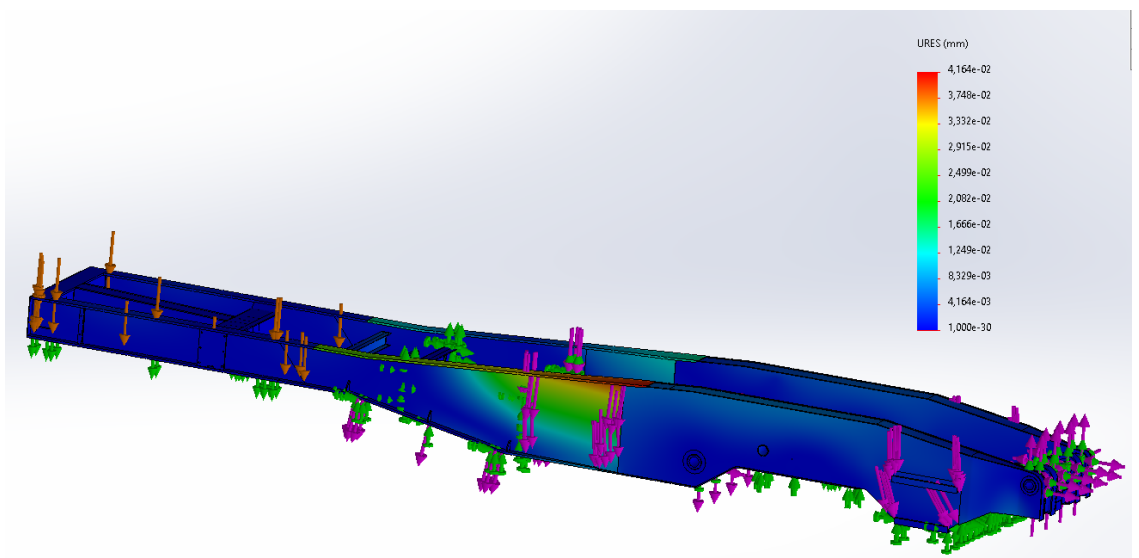


Рисунок 8 – Эпюра перемещений ТУА

Максимальное перемещение составило  $4,164 \cdot 10^{-2}$  мм.

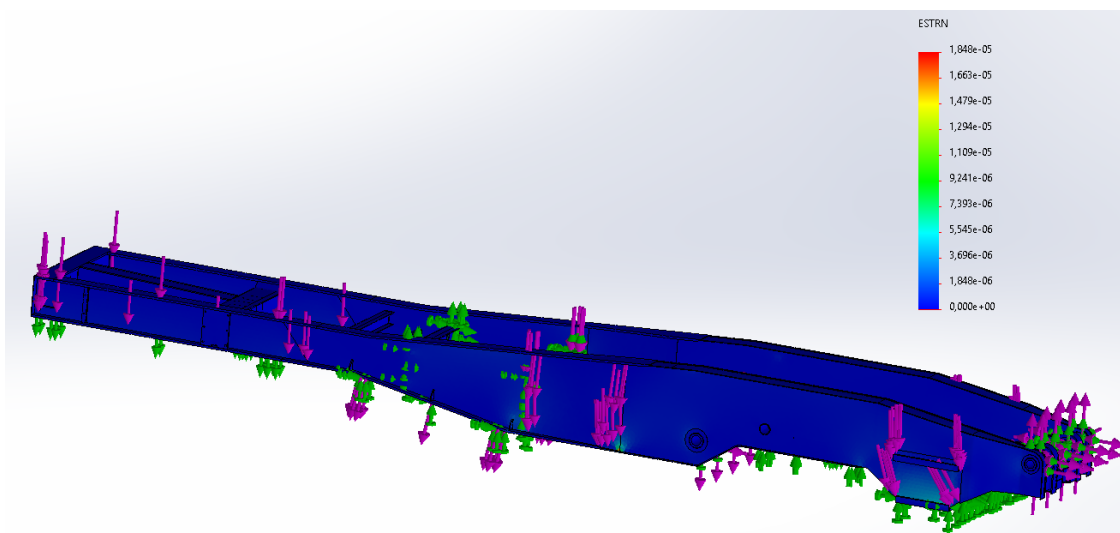


Рисунок 9 – Эпюра деформации металлоконструкции

Максимальная деформация составила  $1,848 \cdot 10^{-5}$  мм

В ходе выполнения статического исследования была выявлена самая нагруженная деталь (рисунок 10), которая в дальнейшем будет использована для проведения моделирования УЗК. Также мы можем убедиться, что платформа ТУА выдерживает все приложенные нагрузки, так как рассчитанное опасное напряжение  $\sigma_{lim} = 7,352 \text{ МПа}$  для стали 10ХСНД меньше допускового напряжения  $[\sigma] = 490 \text{ МПа}$ .

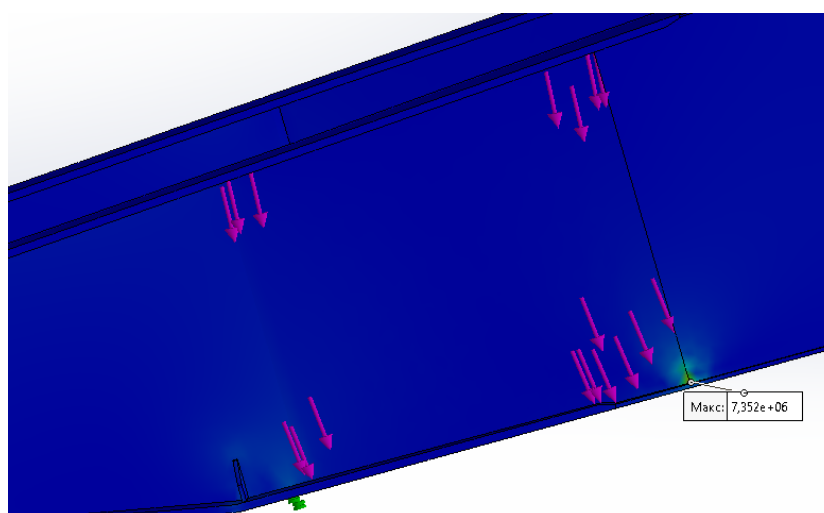


Рисунок 10 – Самая нагруженная деталь

## 2 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЁТА ДЕФЕКТОВ МЕТАЛЛОВ

Чтобы решить задачу неразрушающего контроля используются акустические методы.

Статический анализ параметров отражателей включает в себя накопление базы данных сигналов от искусственно созданных дефектов. Это производится в первую очередь перед разработкой методических указаний. Данный метод является самым надежным.

Главным недостаткам этого метода являются: высокие денежные затраты на изготовление экспериментальных изделий, сложность определения параметров дефекта без разрушения образца, отсутствие возможности создать некоторые типы дефектов (их ориентацию и форму).

Чтобы избежать высокую стоимость создания экспериментальных образцов, нужно проводить численное математическое моделирование УЗК. Также одним из вариантов является составление баз данных сигналов от искусственно созданных дефектов и проведения их статического анализа и компьютерного моделирования

Компьютерное моделирование УЗК позволяет оптимально расположить датчики регистрации и подбор их параметров.

До появления выше описанной методики использовались лучевые построения. С помощью них можно было определить картину волнового поля

В геометрических методах преимущественным методом для получения качественных результатов является лучевой ряд. Перечислим главные недостатки данного способа:

- решения можно использовать только когда у нас размеры дефекта больше длины волны, это явление асимптотического характера;
- на фронтах УЗ импульса наблюдается скачок основных параметров акустического поля.

Но благодаря наглядности изображения распространения волн, лучевые методы также часто применяются.

Создавая различные компьютерные математические модели можно произвести расчеты любых физических явлений. Исключением не является и распространение ультразвуковых волн, так как с помощью мат. моделей можно довольно достаточно описать физические процессы в металлической конструкции

Для создания компьютерной мат. модели можно применять различные программные пакеты, а именно Comsol Multiphysics, Comsol Femlab и другие.

Акустические свойства и форма ОК влияют на создание акустического поля.

Так как аналитическое решение оказывается сложным или не может быть получено, широкую распространенность получили численные методы решения волновых уравнений.

Существует два основных метода решения волновых ДУ: метод конечных разностей во временной области (КРВО) и метод конечных элементов (МКЭ).

## **2.1 Общие сведения об ультразвуке**

Ультразвук – это механические колебания, которые находятся выше области частот (свыше 20 кГц).

Свет перемещается в виде формы волны, таким же образом передвигаются ультразвуковые колебания. Чтобы ультразвук распространялся, он должен находиться в упругой среде (твердое тело, газ, жидкость).

В зависимости от интенсивности ультразвук может оказывать различное воздействие на среды, в которых он распространяется. При относительно малой интенсивности, звуковые колебания не способствуют появлению различных физических или химических изменений среды. В данном случае учитываются физические законы линейной акустики, на этих принципах основаны принципы действия измерительных, контрольных и управляющих приборов.

Волны высокой интенсивности (более  $0,5 \text{ Вт/см}^2$ ) могут способствовать возникновению образованию нелинейных эффектов и оказывают влияние на среду, распространяющиеся на её структуру и свойства. Благодаря этому ультразвук высокой интенсивности стал привлекательным для технологий, которые требуют повышения качества и ускорения течения каких-либо процессов. Высокосконцентрированная звуковая энергия может вызывать термические, механические и электрохимические эффекты.

Период ( $T$ , с) – это промежуток времени, за который система совершает одно полное колебание.

Частота ( $f$ , Гц) – это число колебаний системы совершенных за единицу времени.

Амплитуда ( $A$ , м) – это максимальное значение отклонения от нулевой точки (точки равновесия).

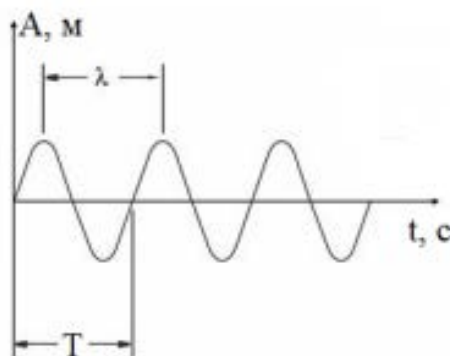


Рисунок 11 – Основные параметры звуковой волны [7]

Интенсивность звука – это средняя по времени энергия, которая переносится звуковой волной через единицу площади, она перпендикулярна к направлению распространения волны, в единицу времени, измеряется в  $\text{Вт/см}^2$ .

Из-за воздействия ультразвуковой энергии высокой интенсивности (свыше  $0,5 \text{ Вт/см}^2$ ), в рабочих средах – в твердых телах, жидкостях, газах – возможно возникновение следующих эффектов:

1. Химические эффекты. Полимеризацию и окислирование можно ускорить при помощи ультразвуковой волны.

2. Акустические течения. В ультразвуковом поле возникают течения, т.е. постоянные вихревые потоки жидкости, такие течения называются акустическими.

3. Генерирование и передача тепла. Всегда когда происходит движение ультразвуковой волны в упругой среде, энергия частично преобразуется в тепло.

4. Механические эффекты. Высокий уровень знакопеременных напряжений, которые создаются при ультразвуковых колебаниях в твёрдых телах, может привести к развитию усталости и разрушению.

## **2.2 Ультразвуковой контроль**

УЗК является одним из основных акустических методов неразрушающего контроля (НК). С помощью акустических методов можно обнаруживать в металлических конструкциях нарушение сплошности, неоднородности структуры, дефекты.

Также при помощи акустических методов можно измерить толщину объекта контроля, а также физико-механические свойства материалов конструкций. Эти методы используются для оценки технического состояния металлоконструкций

Одним из основных достоинством акустических методов НК является возможность их применения для диагностики элементов машин и металлоконструкций в условиях эксплуатации.

К преимуществам неразрушающего контроля акустическими методами относятся:

- высокая чувствительность, с помощью которой можно выявить довольно мелкие дефекты;
- большая проникающая способность, с помощью которой возможно обнаружение внутренних дефектов в больших металлических конструкциях;



– практически мгновенная индикация дефектов, благодаря которой есть возможность автоматизировать контроль;

– возможность контроля при одностороннем доступе к изделию;

– простота и высокая производительность контроля.

В зависимости от направления колебаний частиц по отношению к направлению распространения волны различают продольные, сдвиговые (поперечные), поверхностные, нормальные и крутильные волны.

Волна, у которой направление колебаний частиц в объекте контроля совпадает с направлением распространения волны, называется продольной волной. Это волна возбуждается во всех агрегатных состояниях.

Волна, у которой направление распространения волны перпендикулярно направлению распространению волны, называется сдвиговой. Она может быть возбуждена только в твердом теле, которому свойственно упруго сопротивляться деформации сдвига.

На свободной поверхности твердого тела можно возбудить поверхностные волны, или волны Релея, частицы в которых движутся по эллипсам. Амплитуды колебания частиц по мере удаления от свободной поверхности убывает по экспоненте, поэтому волна локализована в тонком поверхностном слое толщиной  $1 \dots 1,5 \lambda$ .

В плоских телах и телах постоянной толщины (листах, тонких пластинах) можно возбудить нормальные волны или волны Лэмба. Нормальные волны связаны с волноводный механизм распространения УЗ колебаний

В изотропных твёрдых телах скорость распространения упругих волн зависит от их вида, упругих постоянных материала и размеров тела, в котором воона распространяется.

Акустические свойства материалов характеризуется удельным волновым сопротивлением.

Для дальних действующих низкочастотных УЗК используется продольной и крутильные волны, при которых колебания частиц осуществляется в плоскости параллельной направлению распространения волны и перпендику-

лярно поверхности объекта контроля с длиной волны, измеряемой долями метра

Крутильной называется волна, колебания частиц в которой осуществляются в плоскости перпендикулярной направлению распространения волны и параллельной поверхности объекта контроля. Это основная волна применяемая для прозвучивания протяжённых объектов.

Скорость перемещения определенного состояния в упругой среде, называется скоростью звуковой волны

Скорость звука для разных типов волн различна. Она является характеристикой среды.

Скорость поперечной волны:

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (16)$$

где  $\rho$  – плотность среды;

$G$  – модуль сдвига.

Скорость продольной волны:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (17)$$

Волны в упругой среде, которые формируются вдоль свободной границы твердого и довольно быстро затухают с глубиной, называется волнами Рэлея (поверхностными). В волне Рэлея частицы среды колеблются как вдоль, так и перпендикулярно её направлению. В результате траектория движения частиц представляет собой эллипс.



Рисунок 12 – Схема движения частиц в поверхностной волне [7]

### 2.3 Моделирование распространения акустических волн методом конечных элементов

Преимуществом МКЭ является большой выбор программного обеспечения, которые позволяют решить множество различных задач. Этот метод использовался для численного анализа распространения акустических колебаний, ультразвуковых волн и моделирование S-скану дефектоскопа в статьях [1,2,4].

Авторы [2,4] использует похожий интерфейс между собой, а именно Pressure Acoustics и Solid Mechanics. Также САПР COMSOL Multiphysics является усовершенствованием САПР COSMOL FEMLAB. Поэтому у них одинаковые уравнения для решения акустических задач методом КЭ.

Основное волновое уравнение для расчета в этих САПР:

$$\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - d_a \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \left( -\frac{1}{\rho_0} \right) = Q, \quad (18)$$

где  $\rho_0$  – плотность среды;

$c$  – скорость звука в среде;

$p$  – давление;

$t$  – время;

$d_a$  – коэффициент затухания материала (демпфирование);

$Q$  – величина, характеризующая скорость ультразвуковой волны.

Также данные типы интерфейса предназначены для общего структурного анализа модели и вычисления таких параметров как деформации, напряжение и смещения:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \sigma + F, \quad (19)$$

где  $\sigma$  – механическое напряжение;

$F$  – сторонние силы;

$\mathbf{u}$  – вектор смещения;

$\rho$  – плотность среды.

В статье [1] используются соотношения теории упругости. Уравнение движения в матричной форме записывается в следующем виде:

$$M \cdot \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{D} \cdot \dot{\mathbf{u}} + K \cdot \mathbf{u} = F_0, \quad (20)$$

где  $M$  – матрица масс;

$K$  – матрица жесткости;

$F$  – вектор приложенной нагрузки;

$\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \ddot{\mathbf{u}}$  – векторы перемещения и его производные по времени.

Общим для всех статей [1,2,4] можно отметить, что для решения всех уравнений нужно задавать шаг интегрирования  $\Delta t$  (“time increment”). Выбор данного параметра важен для точности результатов. Чтобы ее повысить нужно, уменьшить шаг  $\Delta t$ . Так как для больших шагов решение получается с достаточной погрешностью, а слишком большое уменьшение  $\Delta t$  приводит к увеличению затрат по времени решения задачи, поэтому нужно оптимизировать шаг интегрирования.

Далее рассмотрим более подробную демонстрацию моделирования распространения акустических волн в различных САПР.

### 2.3.1 САПР COSMOS/М (Линейная модель)

Чаще всего данный тип (линейный) модели используются для описания влияния граничных условий на динамические явления. Была смоделирована простая геометрическая модель – стержень длиной 4 м. Стержень моделируется балочными двухузловыми элементами ( $l_e = 2$  м), нижняя грань стержня огра-

ничена по перемещениям вдоль оси  $y$  (шарнирно-подвижная опора), поэтому  $U_y = 0$ . В виде импульсов на концах стержня приложена нагрузка. На рисунке 13 представлен различный характер перемещения  $U_x$  в узлах 1-3. На концах стержня колебания находятся в противофазе, а в середине стержня происходит сложение колебаний, поэтому  $U_x = 0$ .

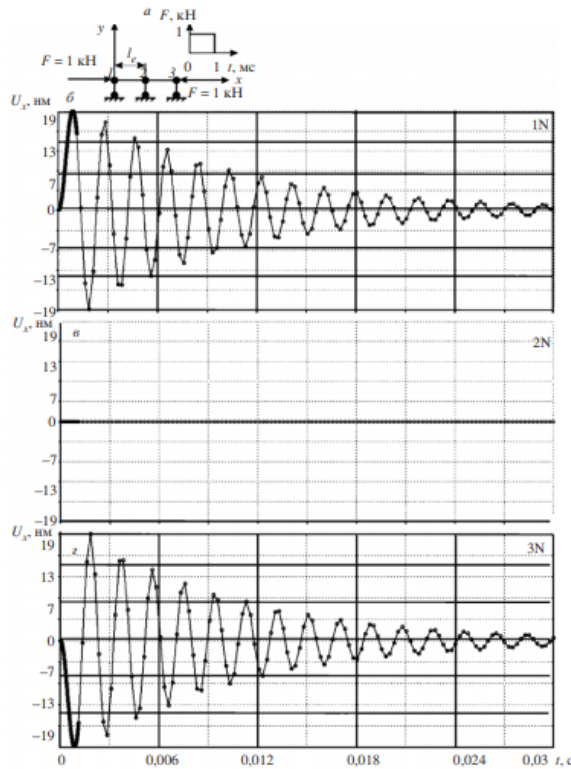


Рисунок 13 – модель 1, где а – граничные условия для линейной модели; б – перемещения  $U_x$  в узле №1, в – перемещения  $U_x$  в узле №2, г –  $U_x$  в узле №3 [1]

### 2.3.2 САПР COSMOS/М (Плоская модель)

Далее рассматривается модель плоского тела в различные моменты времени. Нижняя граница ограничена по перемещениям вдоль оси  $y$ , поэтому  $U_y = 0$  (шарнирно-подвижная опора). По обеим вертикальным сторонам приложена нагрузка в виде распределенной силы, значение которой составляет 10Н.

Длительность импульса составила  $10^{-3}$  с, а его форму можно увидеть на рисунке 14. Диаметр отверстия составил 5 см, а шаг интегрирования подобран до значения 100 мкс. [1]

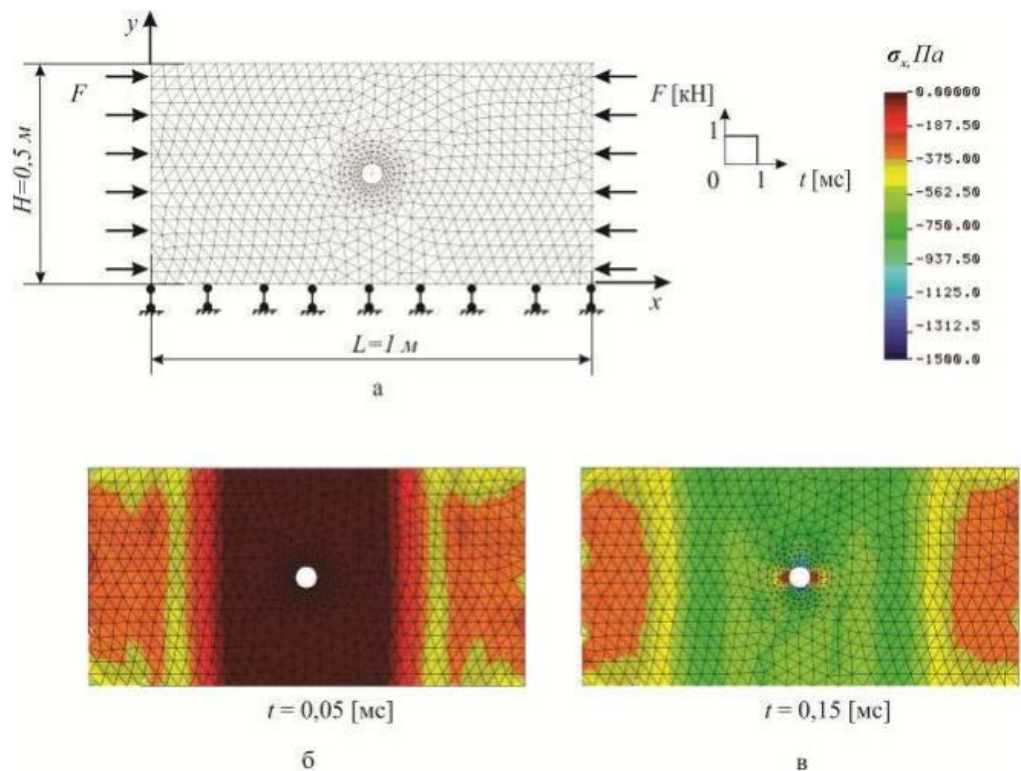


Рисунок 14 – распространение импульса в модели 2, где а – плоская модель, б – изолинии  $\sigma_x$  через  $t_1 = 0,05$  мс после удара, в – изолинии  $\sigma_x$  через  $t_2 = 0,15$  мс после удара [1]

На рисунке 14 изображены напряжения  $\sigma_x$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ . На рисунке 2б акустические волны от обеих граней доходит до четверти модели, а на рисунке 2в волновой импульс со стороны боковых граней проходит  $\frac{3}{4}$  модели и в середине модели происходит сложение волн. Так как у нас имеется отверстие, то вблизи него наблюдается эффект концентрации напряжений.

### 2.3.3 САПР COSMOS/M (Пластина с трещиной)

Была смоделирована модель пластины с трещиновидным концентратором. Условия закрепления: по левой грани – жесткая заделка, на нижней – запрещены перемещения по вертикальной оси. Сила приложена в трещине и составила 1кН, длительность импульса была 0,1 мс. На рисунке 15 представлены поля горизонтальных перемещения.

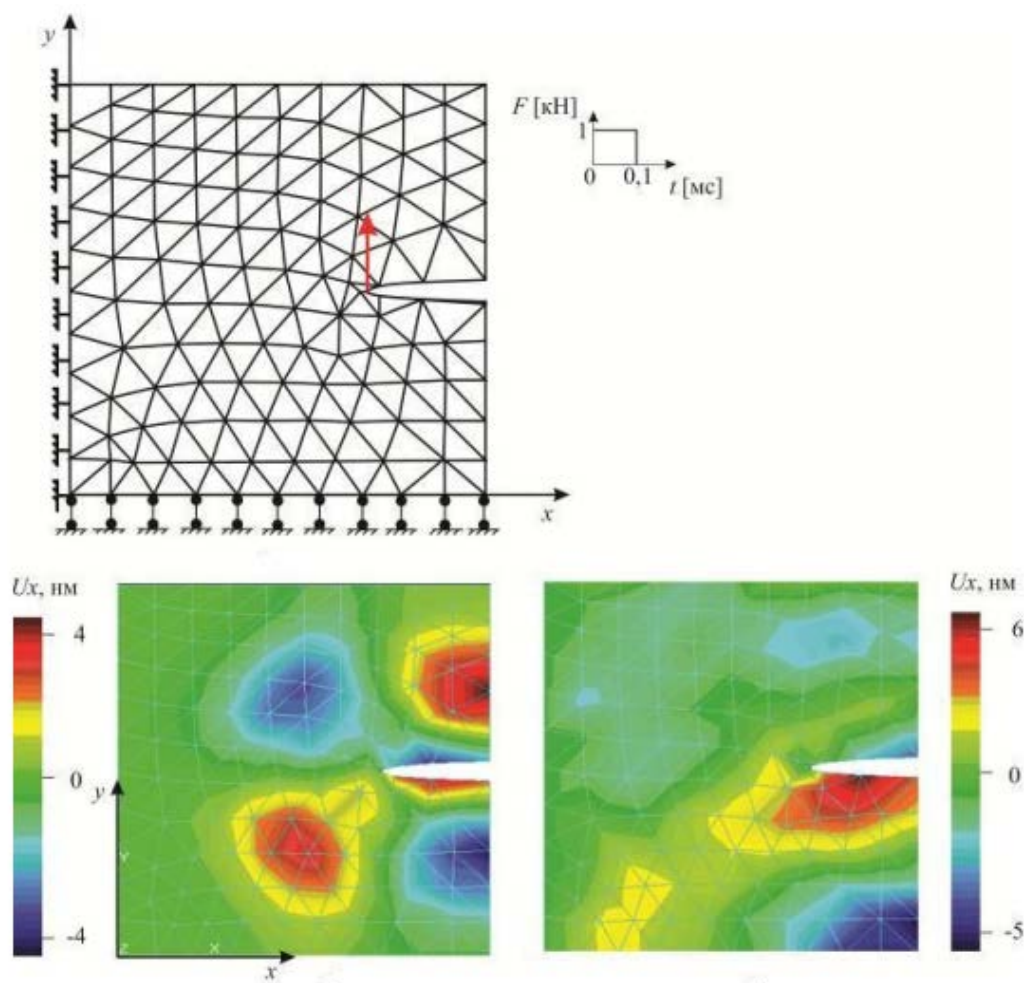


Рисунок 15 – Пластина с трещиной в момент времени  $t_1 = 0,1$  и  $t_2 = 1$  мс после удара соответственно [1]

Также было определено по результатам численного моделирования время прихода волнового импульса от источника до заделки, которое составило 0,19с.

Проанализировав [1] можно сказать, что основным недостатком программы COSMOS/M является её устаревшая версия. Так как численное моделирование распространение акустических волн развивается с каждым днем, поэтому в различное ПО добавляются усовершенствованные модули (например, Pressure Acoustics и UltraSound) для более глубокого анализа поставленных задач. Ведь в этой программе учитываются только распространения напряжения в модели, а также перемещение точек в деталях. Но если в работе будет достаточно определить напряжения и перемещения, то [1] и данную программу можно использовать для данного типа анализа.

### 2.3.4 COMSOL Multiphysics

Интерфейс этого САПР многофункциональный, так как можно быстро создавать компьютерную математическую модель, а также исходные данные в виде граничных условий, внешних воздействий, свойств материала.

Расчет проводится для физических величин, который характеризует свойства материалов и упругих сред, применяемые к волновой теории распространения ультразвуковых волн и механики твердого тела. Для этого используется интерфейс Solid Mechanics, который основывается на решении уравнений Навье.

В модуле Time Depend, который является временным, проводится расчет компьютерной математической модели. Оператору нужно задать шаг по времени, учитывая следующее примечание: чем меньше шаг по времени, тем больше время расчета и требуются более большая производительность компьютера.

Для возбуждения упругой волны применяют точечный источник.

Одним из вариантов сигнала, который описывается функцией 21 применяется синусоидальный импульс полного периода:

$$F(t) = A_0 \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2}\right) \quad (21)$$

где  $A_0$  – амплитуда сигнала;

$f$  – рабочая частота излучателя.

Чтобы упростить визуализацию шага в акустической модели используется фаза  $\pi/2$ . Картина движения акустического поля, которая получается через дискретные промежутки, и будет являться результатом расчета.

Также время расчета и время дискретизации задается оператором.

В статье [4] численное моделирование в двухмерном варианте было проведено для образца  $100 \times 100$  мм (двумерной плоскости) из стали ( $E=200$  ГПа,  $\mu = 0,25$ ,  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>). Данные расчета показали движение акустического поля через 1,6 мкс после начала действия силы. В верхнем левом углу расчетной



схемы находится источник силы, которая вызывает возбуждения. Рабочая частота которого, составляет 5 МГц.

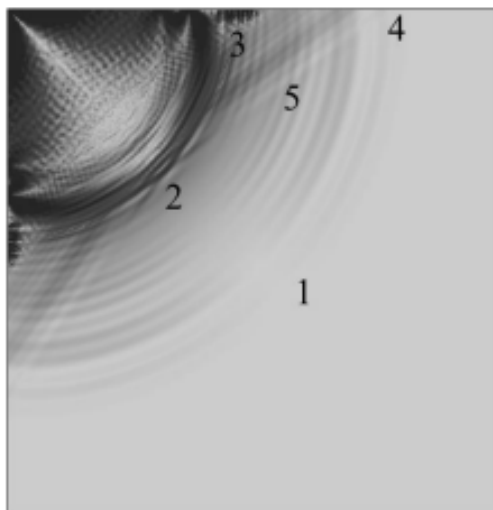


Рисунок 16 – Волны в стали от точечного источника, расположенного на границе расчетной области [4]

Источник силы возбуждает продольные 1 (5552 м/с) и поперечные волны 2 (3493 м/с). На поверхности расчетной области образуются волны Рэлея 3 (3100 м/с) и головная волна 4 (5448 м/с), которая формирует дополнительный фронт поперечных волн 5. Справочные данные для скоростей продольных и поперечных волн в данной стали составляют 5547 м/с и 3397 м/с соответственно. Скорость распространения упругих волн рассчитывалась вручную по «фотографии» распространения акустического поля, записанной для определенного временного отрезка [4].

### 2.3.5 САПР COMSOL FEMLAB

Любое построение модели объекта контроля начинается с задания ее геометрии и размеров. Для модели преобразователя, помимо геометрии и размеров (иногда можно не задавать), основным параметром является частота зондирующих импульсов.

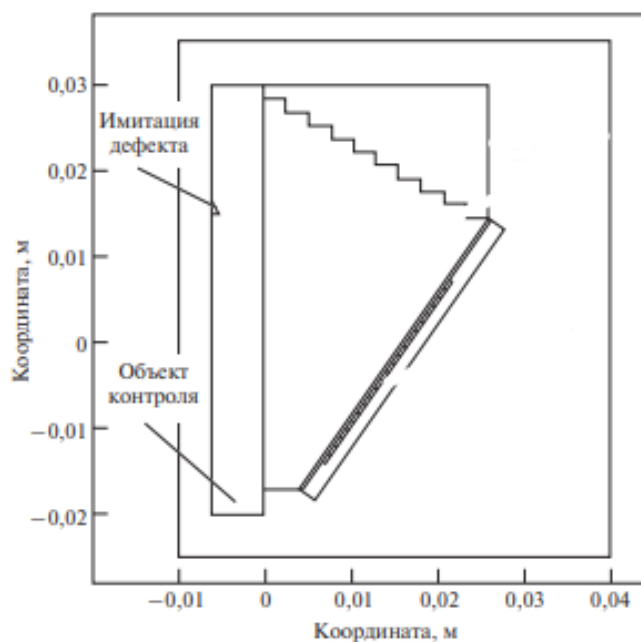


Рисунок 17 – Схема модели [2]

Как уже говорилось выше, гармонический сигнал подбирается экспериментально, это и будет являться условием возбуждения. Этот сигнал должен максимально быть приближен к реальному.

В данном случае использовали следующего уравнение [2]

$$Q(t) = Q_0 \sin(2\pi f_0 t) \quad (22)$$

где  $f_0$  – рабочая частота пьезоэлектрического преобразователя;

$Q_0$  – амплитуда сигнала.

Следующим этапом является разбиение модели на множество конечных элементов. В качестве конечного элемента в двумерной модели используются треугольники. После разбиения модели на конечные элементы задаются свойства материалов ОК и дефекта.

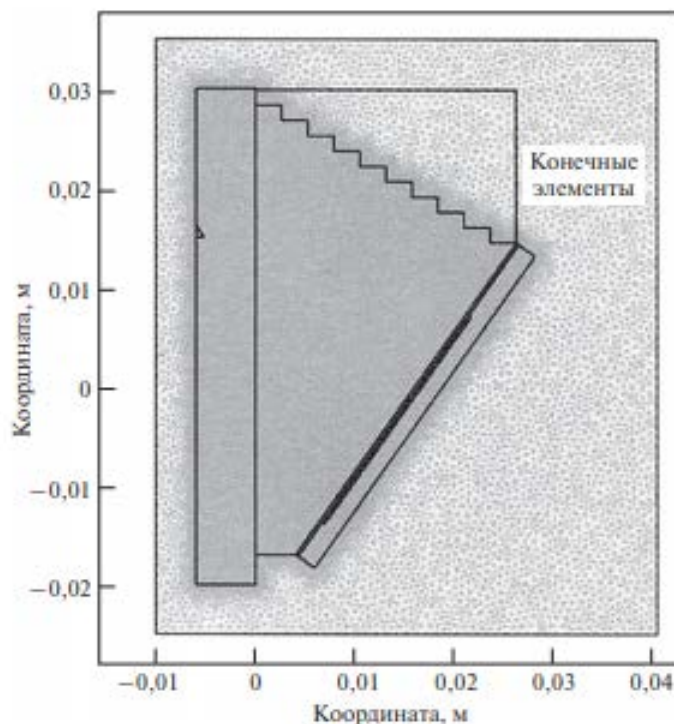


Рисунок 18 – Разбиение модели на КЭ

Затем чтобы продолжить расчет основного ДУ и модели МКЭ, нужно загрузить параметры решателя. Как только будут заданы все параметры, происходит запуск решения модели МКЭ. Расчет производится во временном модуле Time Dependent.

Оператор экспериментальным путем подбирает шаг по времени и по углу сканирования. Нужно сказать, что чем меньше шаг по времени и шаг по углу сканирования, тем дольше рассчитывается вся акустическая модель и требуются больше производительность ПК.

Далее проводится обработка результатов контроля. В САПР Comsol Femlab можно сделать видеозапись распространения ультразвуковой волны. Но, чтобы получить конечный результат обработки в виде S-скана (по аналогии с дефектоскопом) необходимо записать результаты рассчитанной модели в файл цифровых значений и провести его обработку. Для этого применяется отдельный модуль постобработки. После пропускания получаемых сигналов модели через этот модуль получаем изображение, аналогичное S-скану дефектоскопа.

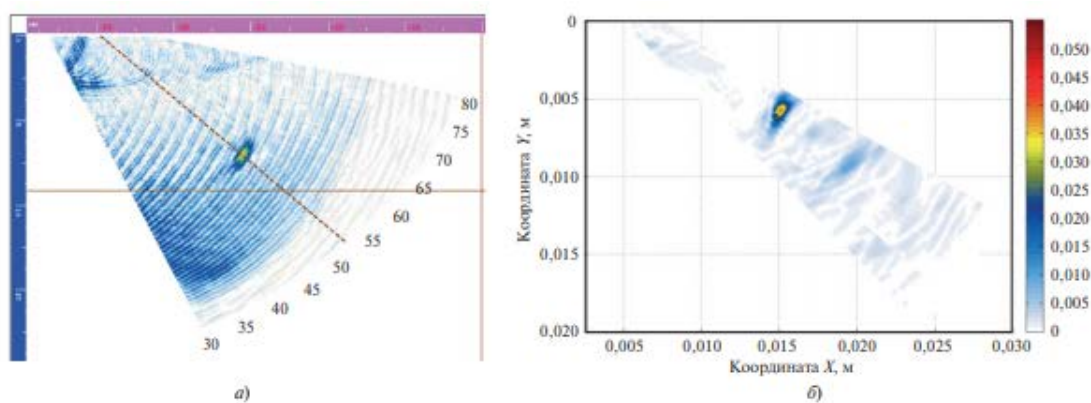


Рисунок 19 – S-скан, полученный при сканирование прибором Harfang X32 (а) и с помощью компьютерного моделирования (б) [2]

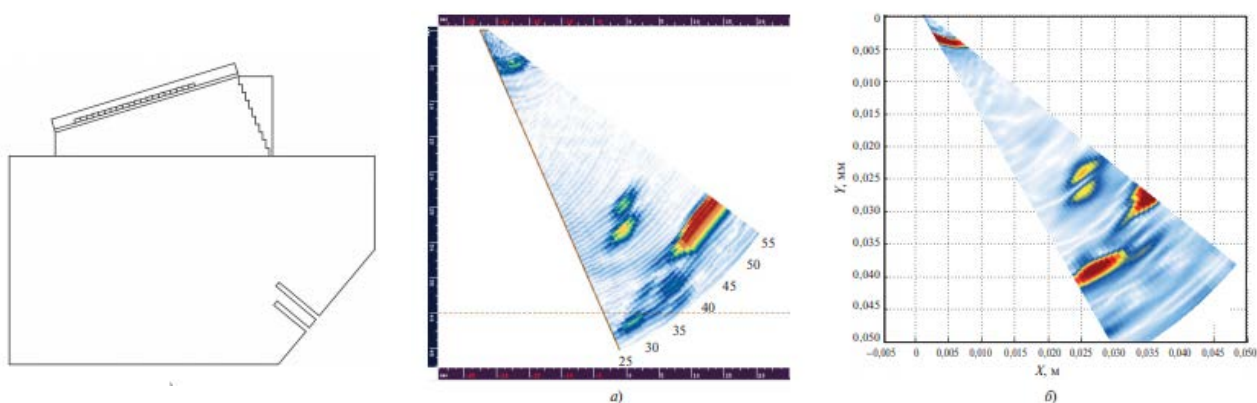


Рисунок 20 – S-скан, полученный прибором Harfang X32 (а) и с помощью компьютерного моделирования (б) [2]

Подводя итоги полученные авторами [2], можем сделать вывод о том, что результаты математического моделирования и снятые при помощи дефектоскопа схожи. Следовательно, можем использовать следующую схему расчета:

- 1) Нужно задать основные параметры ОК, такие как: свойства материалов, типы различных вариантов дефектов, акустические характеристики, а также его размеры;
- 2) Выбираем ДУ волнового уравнения, на этом уравнении строится акустическая модель;
- 3) Производим дискретизацию нашей задачи при помощи численного решения ДУ.

- 4) Далее идет поиск алгоритмов вычисления поставленной задачи;
- 5) Проводим анализ результатов;
- 6) Анализ результатов позволяет проверить правильность результатов, если будут какие либо неточности в решении, то можно под редактировать акустическую модель.
- 7) По полученным данным происходит разработка методические указания по УЗК объекта, и проводят ее экспериментальную проверку на настоящих образцах.

Данная методика позволяет использовать описанный выше способ для накопления базы данных по дефектам и сигналам от них.



Рисунок 21 – Схема вычислительного эксперимента [2]

Так как САПР COMSOL Multiphysics является продолжением САПР COMSOL FEMLAB, то все что проделано в [4] можно сделать и в усовершенствованной программе.

В [4] рассматривалось реализация распространение упругих волн. Это является базой для решения акустических задач неразрушающего контроля (НК). Поэтому результаты, которые получились в [2] являются продолжением статьи [4]. Также в [2] подробно описана схема для накопления базы данных по дефектам и сигналам от них, которую можно использовать в любых расчетах.

Главным недостатком данных программ является относительно высокие системные требования к ПК. Чем мощнее электронно-вычислительная машина, тем быстрее будет производиться расчет. Основным плюсом это довольно простой интерфейс и взаимодействие с другими САПР.

## **2.4 Моделирование распространения ультразвука методом конечных разностей во временной области**

Метод КРВО присущ очень много плюсов:

- моделирование нестационарных волновых процессов в вязкоупругих, неоднородных анизотропных средах;
- расчет ультразвуковых волн возможен с очень сложными граничными условиями;
- получение решений во времени (с некоторым дискретным шагом  $\Delta t$ );
- при использовании ПК можно применить достаточно простой алгоритм вычислений.

Главным недостатком метода КРВО является накопление ошибок решений, это выделяют авторы статьи [3]. Это возникает из-за погрешностей округления, а также ложных волновых процессов

Одной из сложности использования метода КРВО, которая заключается в применении большой оперативной памяти персонального компьютера.

### **2.4.1 Описание алгоритма расчета**

В статье [3] разрабатывается собственный комплекс ПО для решения акустических задач. Этот программный комплекс позволяет построить акустическое поле с учетом материала изучаемого объекта, геометрии и дефектов. В основе вычислительного алгоритма лежит модель Кельвина вязкоупругой среды:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} + \eta_{ijkl} \frac{\partial \varepsilon_{kl}}{\partial t}, \quad (23)$$

где  $\sigma_{ij}$  – тензор напряжений;

$\varepsilon_{ij}$  – тензор деформации;

$C_{ijkl}$  – тензор упругости;

$\eta_{ijkl}$  – тензор вязкости;

$t$  – время.

Суть Модели Кельвина заключается в том, что все элементы начинают испытывать одинаковую деформацию при действии на них силе, которая складывается алгебраически из силы действующих на вязкий элемент и пружину. Пружина и демпфер являются механическими моделями вязкоупругого поведения.

Также в разрабатываем программном обеспечении используется второй закон Ньютона для сплошной среды:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_i, \quad (24)$$

где  $\rho$  – плотность материала;

$v_i$  – компоненты вектора скорости;

$F_i$  – компоненты вектора сторонних сил, действующих на среду.

Решением уравнений (23) и (24) являются зависимости компонент вектора скорости и тензора напряжений от координат  $x_1, x_2, x_3$  и времени.

Суть метода КРВО заключается в том, что непрерывные функции заменяются дискретными аналогами, далее происходит дискретизация пространства и времени  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta t$ , и начинает формироваться сетка решений скорости  $v_i$  и тензора  $\sigma_{ij}$  волновых уравнений.

Пусть индексы  $i, j, k, h$  характеризуют точку в пространстве и временном слое  $x_1 = i\Delta x_1, x_2 = j\Delta x_2, x_3 = k\Delta x_3, t = h\Delta t$ . Тензор напряжений определяется в узлах  $i\Delta x_1, j\Delta x_2, k\Delta x_3, h\Delta t$  по уравнению (23), а расчеты вектора скорости для уменьшения погрешностей сдвинуты на полшага дискретизации пространства и времени  $(i + 0.5)\Delta x_1, (j + 0.5)\Delta x_2, (k + 0.5)\Delta x_3, (h + 0.5)\Delta t$  и рассчитываются по уравнению (24) [3]

Расчет волн выполняется в два этапа. На первом этапе определяется вектор скорости колебаний во временном слое  $(h + 0.5)$ , второй этап содержит вычисление компонент тензора напряжений в слое  $(h + 1)$ . Процедура расчета многократно повторяется, производится экстраполяция волнового процесса из прошлого в будущее. Алгоритм имеет название – двуслойная схема КРВО [ 3].

#### 2.4.2 Применение двуслойной схемы КРВО

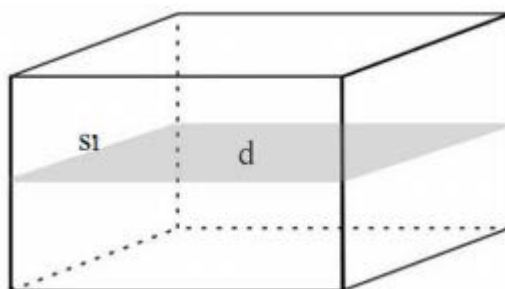


Рисунок 22 – Стальной куб [3]

Исходные данные: куб размером  $(15 \times 15 \times 15)$  мм, материал куба сталь (коэффициент Пуассона  $\mu = 83$  Гпа и плотностью  $\rho = 7.8$  кг/дм<sup>3</sup>), в середине куба располагается точечный источник излучения S1, который создает возмущение в виде однократного импульса прямоугольной формы длительностью 0,01 мкс, частота дискретизации  $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = 0,05$  мм, временной шаг  $\Delta t = 0.5$  нс.

В сечение d будет просматриваться результаты расчета, так как амплитуды разных типов волн различаются.

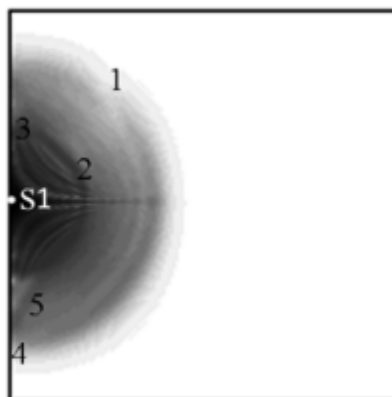


Рисунок 23 – Волны точечного источника [3]



Источник силы возбуждает продольные волны 1 (со скоростью распространения  $v = 6000$  м/с) и поперечные волны 2 (со скоростью распространения  $v = 6000$  м/с). На поверхности образуются волны Рэлея 3 и головная волна 4.

Головная волна генерирует фронт поперечных волн 5, который, согласно теории. Можем отменить, что компьютерное численное моделирование дает совпадение по скорости распространения с реальными измерениями для этой стали и по типу возбуждаемых волн.

Далее рассмотрим моделирование влияние дефекта на распространение акустического сигнала.

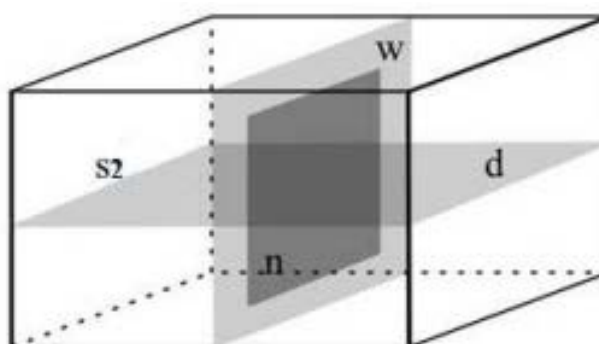


Рисунок 24 – Стальной параллелепипед с дефектом [3]

Исходные данные: стальной параллелепипед размером (15x15x15) мм, материал куба сталь (коэффициент Пуассона  $\mu = 83$  Гпа и плотностью  $\rho = 7.8$  кг/дм<sup>3</sup>),  $n$  – дефект в виде полости размером (10x10x0.1) мм, расположенный в плоскости  $w$ , в середине ребра куба расположен источник возмущения  $S2$  размером (3x1) мм, который создает возмущение в виде однократного импульса прямоугольной формы длительностью 0,01 мкс, частота дискретизации  $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3 = 0,05$  мм, временной шаг  $\Delta t = 0.5$  нс.

В сечение  $d$  и  $w$  будет демонстрироваться результаты расчета.

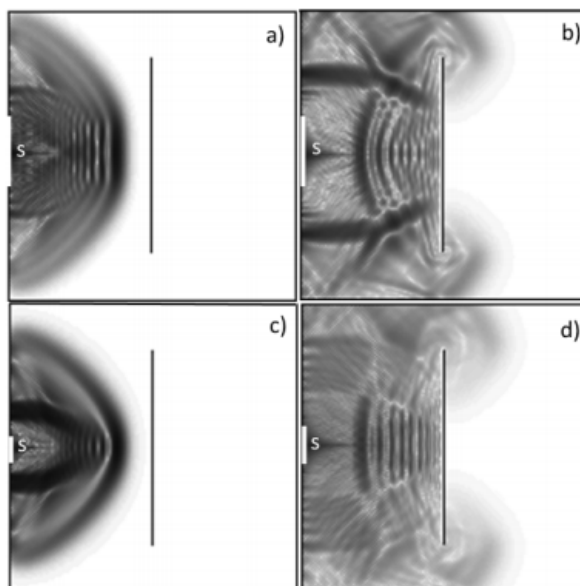


Рисунок 25 – Волны прямоугольного источника, где а – распространение в плоскости d в момент времени  $t = 0,5$  мкс, б– распространение в плоскости d в момент времени  $t = 1$  мкс, где с – распространение в плоскости w в момент времени  $t = 0,5$  мкс, д– распространение в плоскости d в момент времени  $t = 1$  мкс [3]

В любой точке среды в данный момент времени колебания представляют собой сумму волн, пришедших от различных элементов поверхности излучателя. Так как длина пробега от элемента поверхности до излучателя разная, то образуется сложный волновой фронт колебаний. Происходит отражение от дефекта, а также дифракция на краях дефекта.

Также видно, что размеры излучателя по разным направлениям влияют на акустическое поле.

### 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В ДЕТАЛИ ТУА

При проведении статического анализа платформы транспортно-установочного агрегата было выявлено, что она не подвергается пластическим деформациям. Так как раму ТУА является сварной конструкцией, поэтому в процессе эксплуатации в сварных швах у нас могут возникнуть дефекты (поры, трещины, твердые включения). Для их обнаружения используются ультразвуковой контроль.

#### 3.1 Эхометод

Так как эхометод будет частично реализован в данной работе, то рассмотрим его поподробнее.

Он относится к акустическим методам отражения. Эти методы используют сигналы, отраженные от дефектов. Информативными параметрами могут быть амплитуда волны (содержит информацию о размере дефекта), время прихода импульса (характеризует глубину залегания дефекта), фаза колебаний.

Эхометод – метод, основывается на регистрации эхосигналов от дефектов.

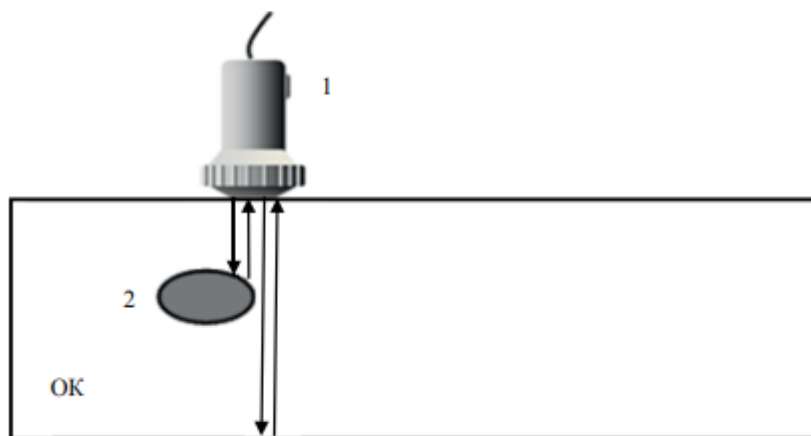


Рисунок 26 – Функциональная схема эхометод, где 1 – пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП); 2 – дефект [13]

Прошедшие через изделия упругие волны отражаются от дефектов и дна (ОК).

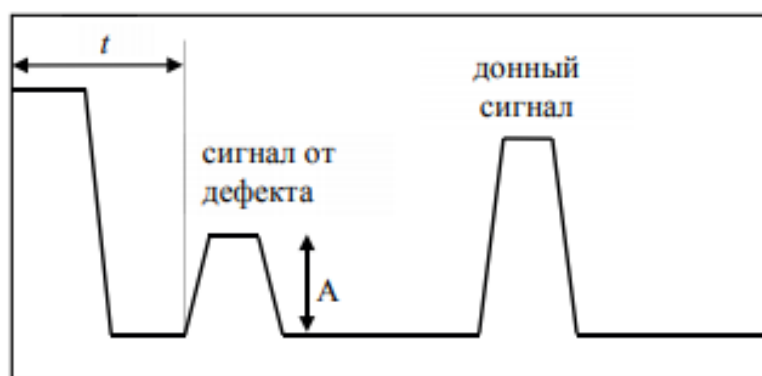


Рисунок 27 – Вид экрана дефектоскопа для изделия с дефектом при контроле эхометодом [13]

Эхосигнал от дефекта приходит раньше донного сигнала, и амплитуда его обычно значительно меньше. Измеряя времена приходов сигнала по шкале на экране, можно определить расстояние до дефекта или дна изделия. Амплитуда эхосигнала характеризует отражательную способность дефекта и позволяет оценить его размер. Благодаря универсальности, надежности, высокой чувствительности к выявлению дефектов, возможности применения к различным материалам, эхо-метод получил наибольшее распространение среди акустических методов контроля.

### **3.2 Методика проведения НК детали ТУА с воздушным зазором и анализ результатов**

Для УЗК была выбрана деталь, в которой возникают самые большие напряжения. В данной работе не рассматривается моделирование самого датчика, поэтому искусственным образом создаем плоскость, которая будет испускать волновой импульс. Также акустическая модель состоит из двух сред: воздуха и стали 10ХСНД. Далее будет рассмотрена построение модели с дефектом. (Аналогичная модель без дефекта). Создаем дефект радиус, которого будет равен 2.5 мм, данный дефект является допустимый при эксплуатации согласно ГОСТу 30242-97 «Дефекты соединений при сварке металлов плавлением»

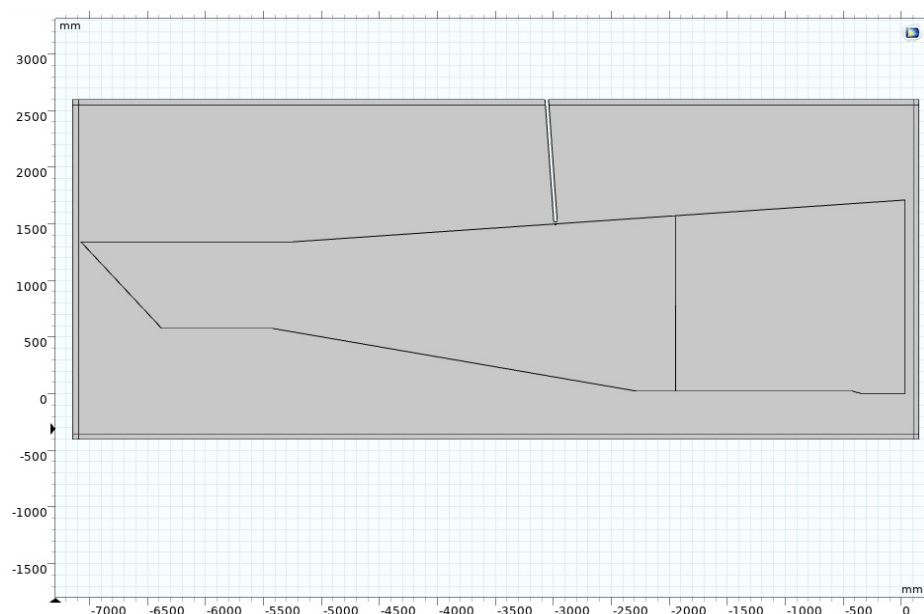


Рисунок 28 – Акустическая модель (с дефектом)

Для решения задачи неразрушающего контроля рассмотрим численную реализацию решения основного волнового уравнения методом конечных элементов при помощи ПО Comsol Multiphysics, которое выражено следующим соотношением (18)

Решение уравнения (18) осуществляется в следующем порядке:

а) задаём исходные данные (скорость распространения продольных волн [331 м/с], скорость распространения поперечных волн [3255 м/с] и частоту излучателя [4 МГц]);

б) вводим основные параметры стали 10ХСНД (модуль упругости  $E = 1,97 \cdot 10^5$  МПа и коэффициента Пуассона  $\nu = 0,25$ );

в) задаём возбуждающий импульс, который будет создавать упругую волну (гармонический сигнал описывается Гауссовой функцией);

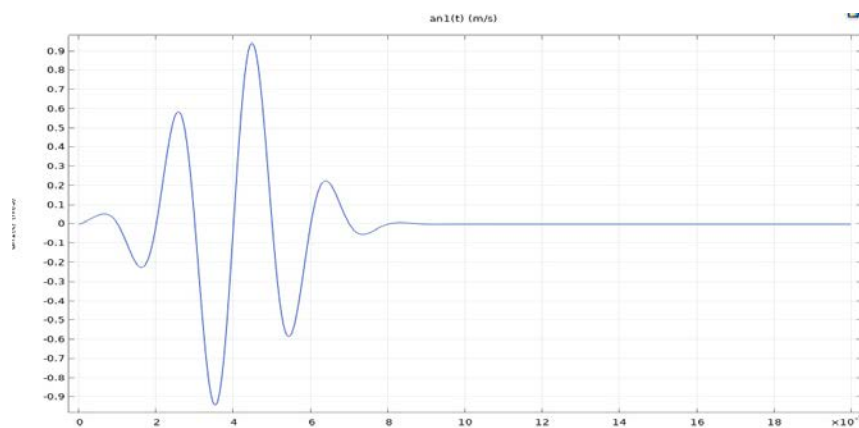


Рисунок 29 – Возбуждающий импульс

г) создаем сетку методом конечных элементов (с максимальным размером элемента 1,324 [13,02] мм) и создаем шага по времени ( $2 \cdot 10^{-6} c$ ). В качестве конечного элемента в двумерной модели используются треугольники. Для акустических задач параметрами сетками является размер, который равен длина волны деленная на  $n$ . Где  $n$  подбирается экспериментальным путем, чем меньше  $n$ , тем точнее результат. Но тем больше требуется времени на создание сетки и мощные вычислительные ресурсы. В модуле Time Depend, который является временным, проводится расчет математической модели;

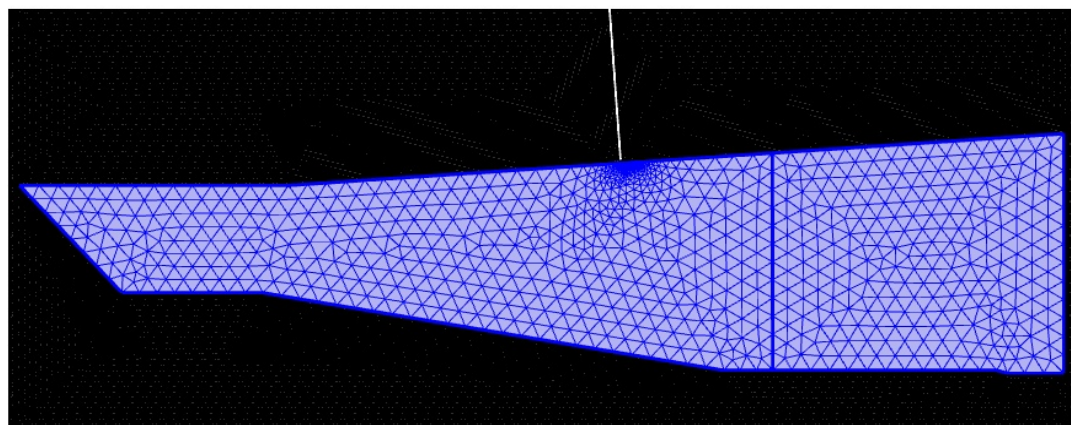


Рисунок 30 – Создание сетки детали ТУА

д) визуализируем результаты расчета и проводим сравнительный анализ.

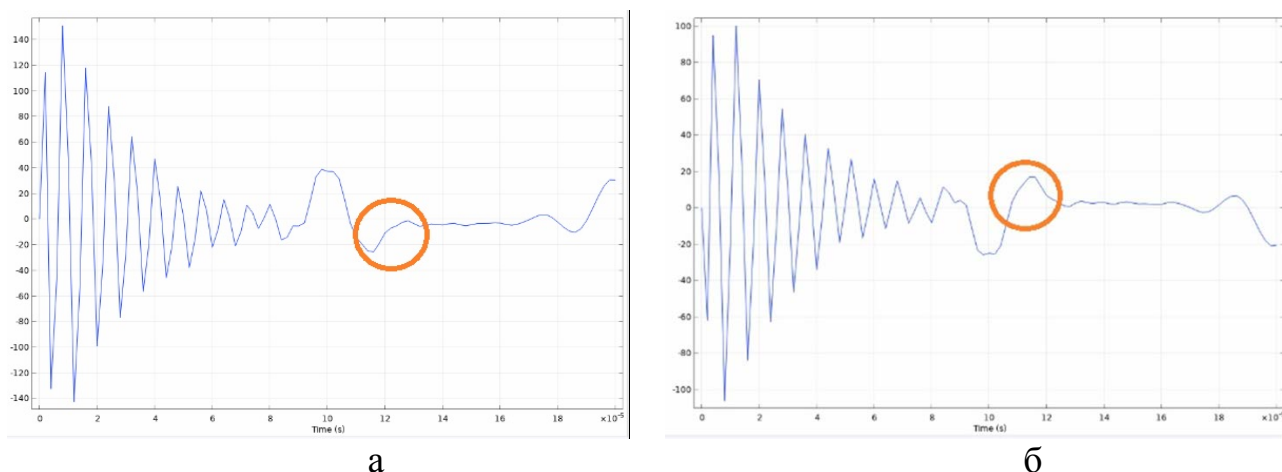


Рисунок 31 – Зависимость давления ультразвуковой волны от времени в детали без дефекта (а), в детали с дефектом (б)

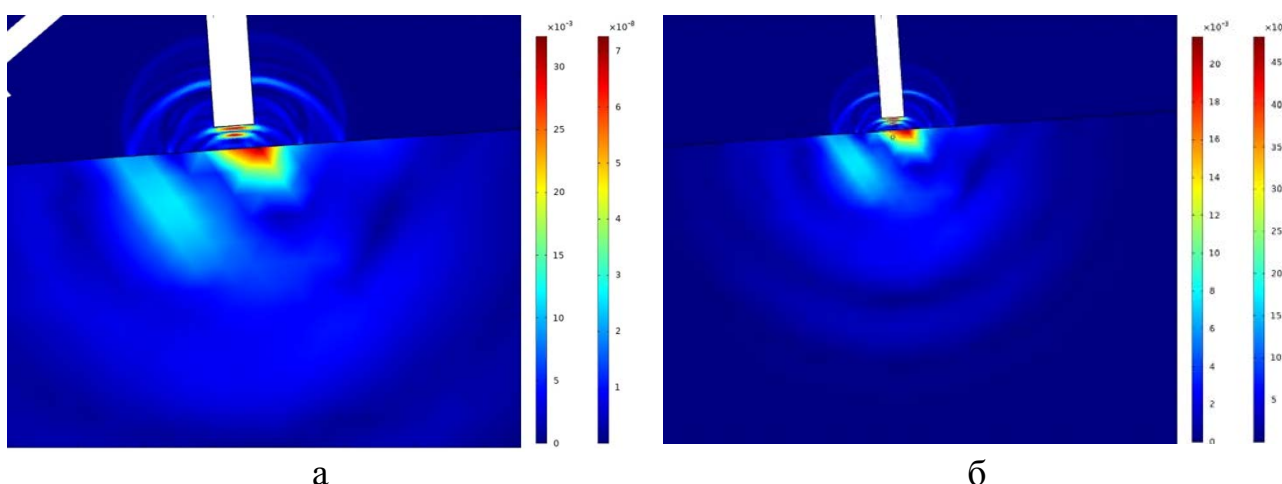


Рисунок 32 – Эпюра распространения ультразвуковых скоростей в детали без дефекта (а), в детали с дефектом (б)

Так как у нас деталь большая, поэтому донного сигнала мы не можем наблюдать (волновой фронт ослабевает и в дальнейшем затухает, поэтому он не успевает дойти до «дна», отразится и вернуться).

Так же мы видим, что первый скачок (который не выделен маркером) связан с переходом из одной среды в другую, а скачок, который выделен маркером, происходит из-за того, что импульс встречает на своем пути дефект.

При времени  $11 \cdot 10^{-5}$  с происходит увеличение давления упругой волны на 38 Па.

Для более наглядного представления, эпюры распространения ультразвуковых волн в воздухе (левая школа) и в стали 10ХСНД (правая) Как мы видим, на данном рисунке на границе раздела сред (воздуха и стали 10ХСНД) наблюдается резкое уменьшение ультразвуковой скорости, а именно в 500000 раз. Это связано с тем, что часть упругих волн поглощается, а часть отражается. Это явление можно подтвердить при помощи уравнения (18). Анализируя основное волновое уравнение, можно увидеть следующую зависимость: скорость звука в среде обратна пропорциональна величине, характеризующая ультразвуковую скорость.

Так же можно сказать, что скорость на детали без дефекта больше в 1,5 раза, чем на детали с дефектом. Дефект слабо влияет на распространение волнового фронта.

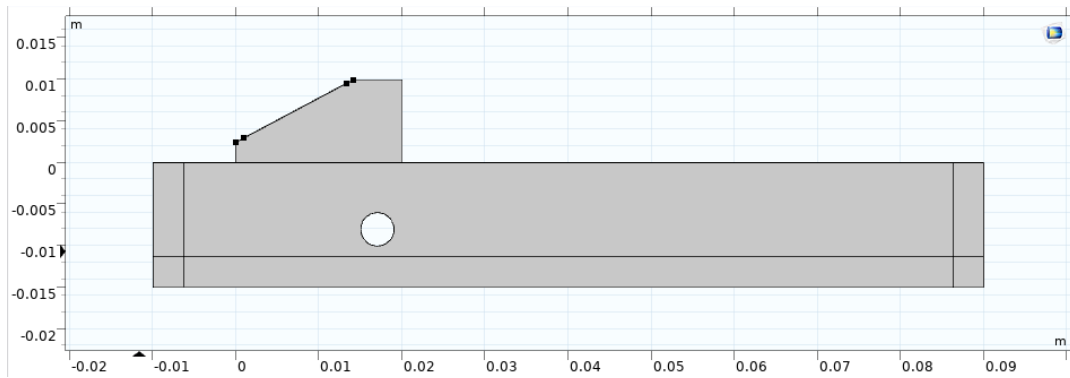
Все выше сказанное объясняется взаимодействием акустических волн с дефектами структуры.

### **3.3 Методика проведения НК детали ТУА без зазора и анализ результатов**

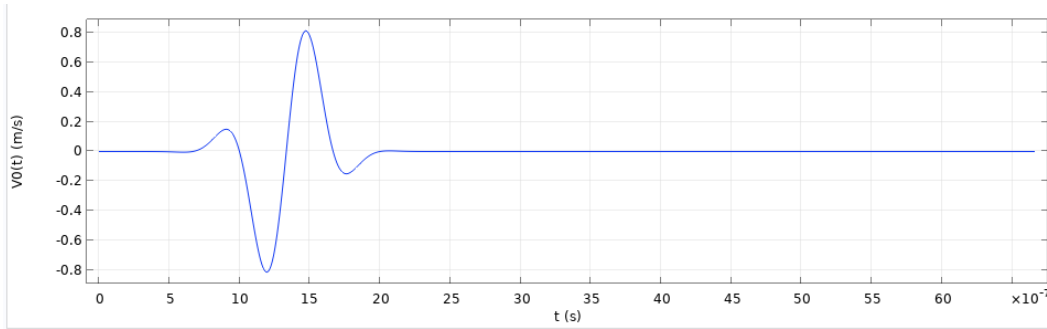
Основная суть и методики точно такая же, как и в пункте 3.2. Для более наглядного отображения распространения упругих волн (отражения от дефекта) в детали, было решено увеличить саму картинку. Также на края детали установлен Absorbing Layer, чтобы упругие волны не отражались от мнимого дна детали.

На рисунке 33 представлена краткая последовательность расчета.

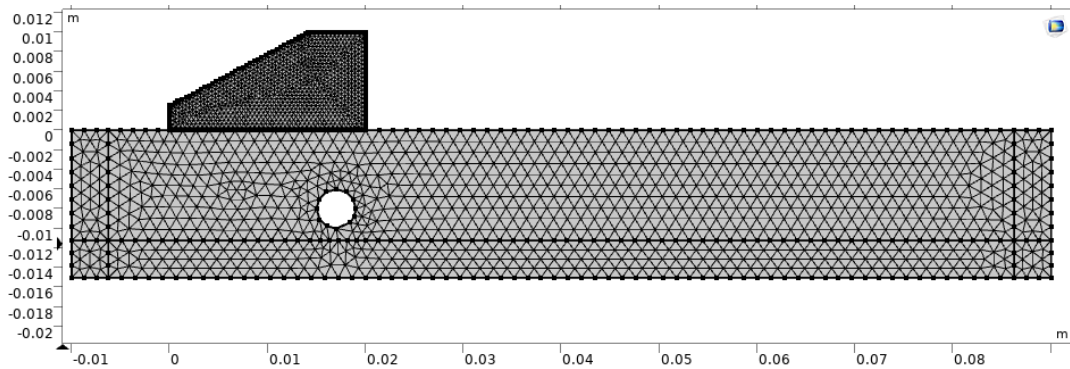




а



б



в

Рисунок 33 – Краткий алгоритм расчета, где а – акустическая модель, б – возбуждающий импульс, в – сетка МКЭ

На рисунках 34 и 35 представлены результаты расчета

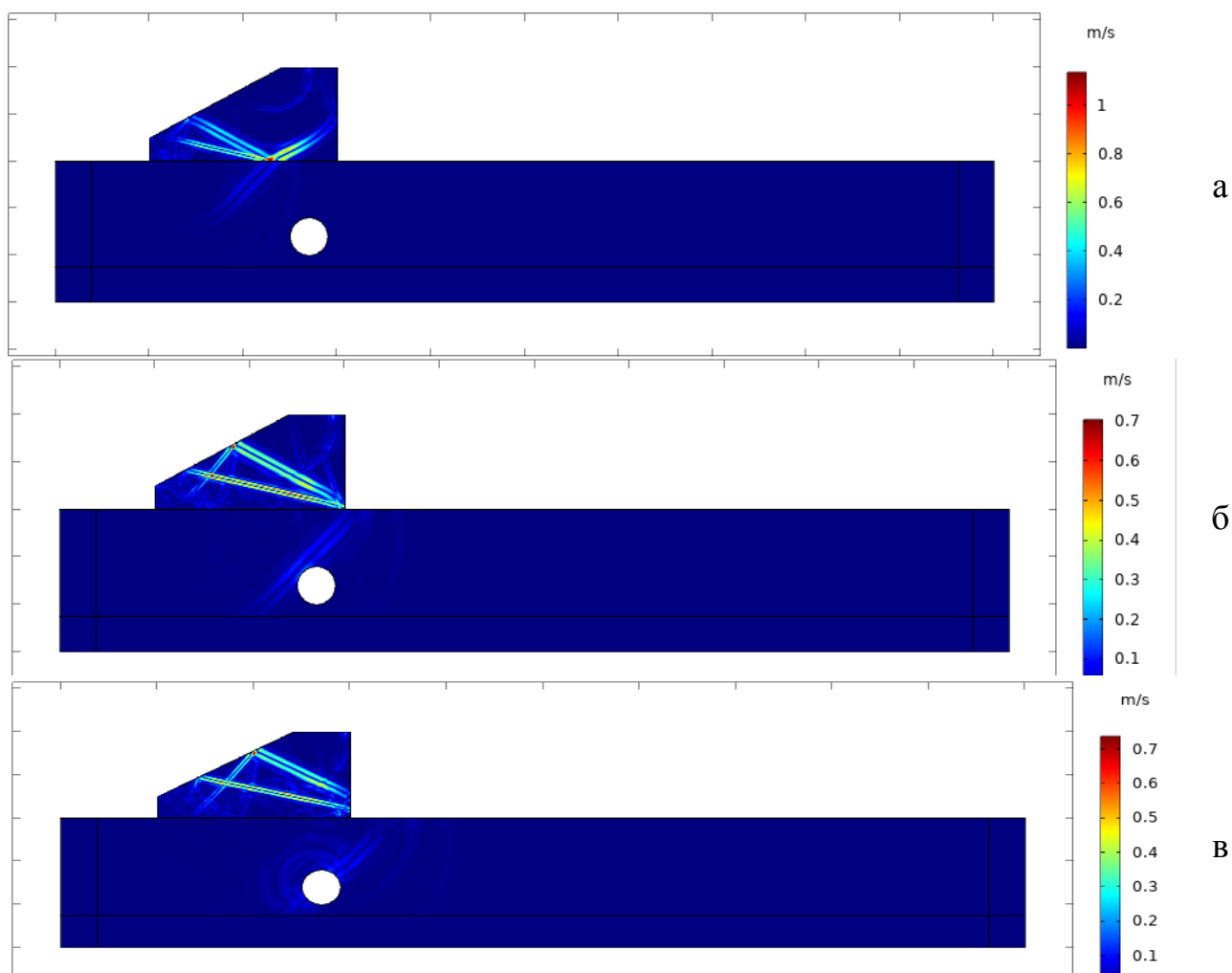


Рисунок 34 – эпюра распространения ультразвуковых скоростей в разные момент времени, где а – момент времени  $5,3 \cdot 10^{-6}$  с, б – момент времени  $7,2 \cdot 10^{-6}$  с, в – момент времени  $8 \cdot 10^{-6}$  с

На рисунке 34 видно, что сначала в призме датчика распространяется продольная волна, которая вызывает сдвиговую волны в стали. Когда импульс достигает детали, то происходит его преломление.

Импульс в момент времени  $7,2 \cdot 10^{-6}$  с доходит до дефекта, отражается он него и возвращается обратно в датчик.

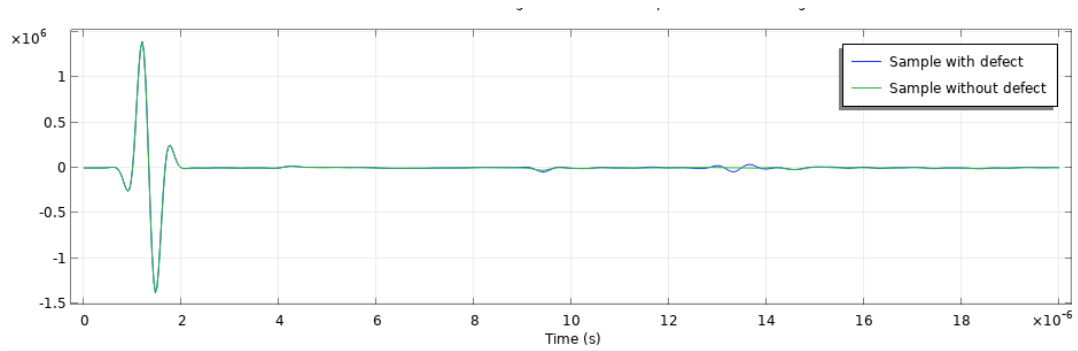


Рисунок 35 – Зависимость давления ультразвуковой волны от времени в детали

Для более глубокого анализа результатов было решено соотнести две зависимости давления ультразвуковой волны от времени в детали с дефектом и без него. Благодаря этому мы увидели, что в месте, где находится дефект, происходит увеличение упругой волны. Небольшие колебания на рисунке 35 обусловлены множественным отражением ультразвуковых волн в призме датчика.

В момент времени  $13,3 \cdot 10^{-6}$  с импульс доходит до приёмного устройства.

### 3.4 Расчет погрешностей координат дефекта

Чтобы определить местоположение дефекта, нужно использовать данные времени между моментом генерации зондирующего импульса и временем прихода эхо-импульса  $T_{\text{ЭХО}}$ .

Для более точного результата время задержки импульса в призме датчика надо исключить  $2T_{\text{П}}$ .

Расстояние до дефекта по лучу можно рассчитать по формуле:

$$R = \frac{C \cdot (T_{\text{ЭХО}} - 2 \cdot T_{\text{П}})}{2}, \quad (25)$$

где  $c$  – скорость волны в материале ОК, м/с

расстояния до дефекта по поверхности ввода необходимо воспользоваться значением угла ввода  $\alpha$ :

$$Y = R \cdot \cos \alpha = \frac{C \cdot (T_{\text{эхо}} - 2 \cdot T_{\text{П}})}{2} \cdot \cos \alpha \quad (26)$$

$$X = R \cdot \sin \alpha = \frac{C \cdot (T_{\text{эхо}} - 2 \cdot T_{\text{П}})}{2} \cdot \sin \alpha \quad (27)$$

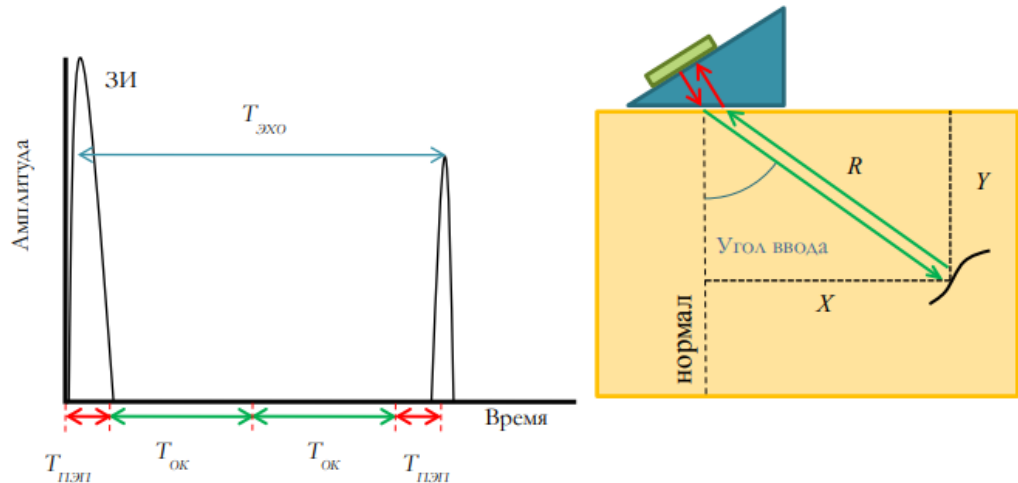


Рисунок 36 – Определение координат дефекта [13]

Для того чтобы точно рассчитать координаты дефекта в НК с зазором, нужно устанавливать различные модули и требуется больше вычислительной мощности ПК, именно поэтому, мы рассчитаем только глубину залегания дефекта. Подставляя наши значения в формулу (26) получаем

$$Y = \frac{3255 \cdot (11,5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 4 \cdot 10^{-7})}{2} \cdot \cos 82 = 25,8 \text{ мм}$$

Тогда погрешность  $\Delta$  будет равна

$$\Delta = \frac{25,8 - 25}{25,8} \cdot 100\% = 3,1\%$$

В НК без зазора никаких дополнительных функций не требуется, поэтому рассчитаем глубины залегания и расстояние до дефекта по формуле 26 и 27 соответственно

$$Y = \frac{3255 \cdot (13,3 \cdot 10^{-6} - 2,05 \cdot 10^{-6})}{2} \cdot \cos 44 = 5,97 \text{ мм.}$$

Тогда погрешность  $\Delta$  будет равна

$$\Delta = \frac{6 - 5,97}{6} \cdot 100\% = 0,5\%.$$

$$X = \frac{3255 \cdot (13,3 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 2,05 \cdot 10^{-6})}{2} \cdot \sin 44 = 10 \text{ мм.}$$

Тогда погрешность  $\Delta$  будет равна

$$\Delta = \frac{10 - 9,5}{10} \cdot 100\% = 5\%.$$

Как мы видим, оба метода оказываются довольно точными, поэтому делаем вывод, что посчитанные результаты верные. А также представленные методики расчета НК можно использовать для накопления базы данных сигналов от различных типов дефектов ТУА.

### 3.5 Оценка НДС при помощи метода акустоупругости

Метод акустоупругости: метод акустического НК, который основанный на измерении скорости распространения упругих колебаний, зависит от физических и механических свойств, а также НДС. Акустоупругий эффект – это нелинейный эффект определяющего отношения между механическим напряжением и конечной деформацией в материале непрерывной массы.

Уравнения акустоупругости для продольных и поперечных волн представляются в виде:

$$\frac{\Delta C_l}{C_{l0}} = \beta_{zz}^c \sigma_{zz} \quad (28)$$

$$\frac{\Delta C_l}{C_{l0}} = \beta_{zz}^c \sigma_{zz} \quad (29)$$

где  $\beta_{ji}$  — акустоупругие коэффициенты по скорости, определяемые константами упругости второго порядка Ламе  $\lambda$ ,  $\mu$  и третьего порядка Мурнагана  $l$ ,  $m$ ,  $n$ .

Для исследования влияния напряженно-деформированного состояния на акустические свойства была использована акустическая модель (рисунок 28). Данная модель подвергалась ступенчатому нагружению.

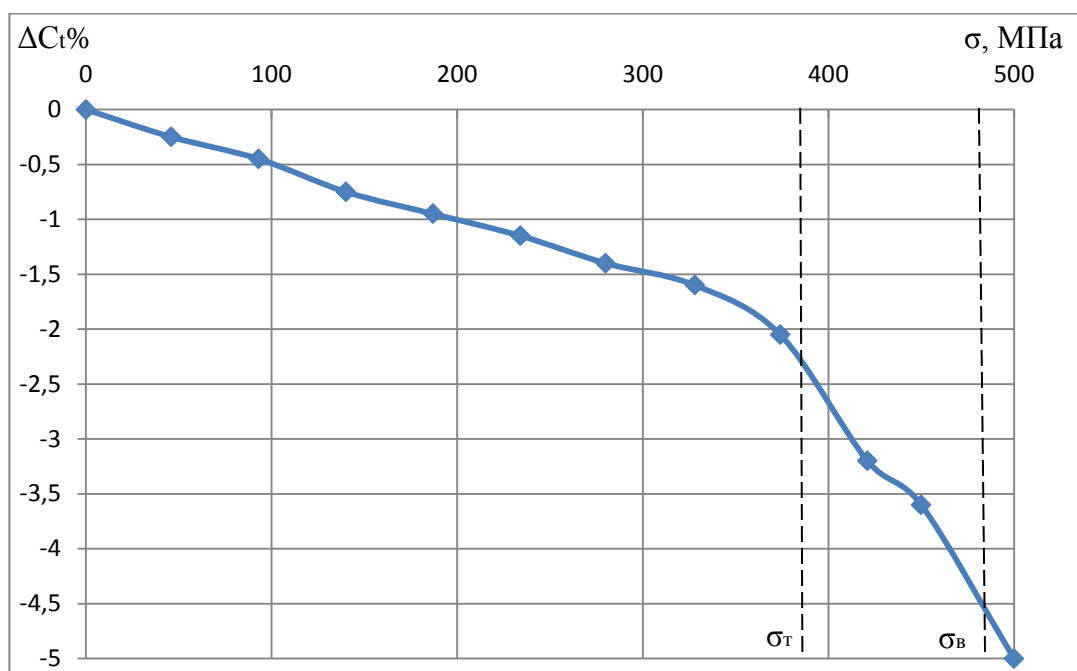


Рисунок 37 – Изменение скорости поперечных волн от приложенной нагрузки

Анализируя рисунок 37, можно сделать вывод, что при увеличении нагрузки происходит линейное снижение скорости поперечных волн. При приближении к пределу текучести стали 10ХСНД (392 МПа) происходит резкое уменьшение скорости поперечных волн, из-за возникновения в стали пластических деформаций. Если продолжать нагружение, то скорость начинает еще резче падать, и напряжения в стали достигают предела прочности (490 МПа).

При проведении НК методом акустоупругости было выявлено, что когда происходит изменение скорости поперечных волн на минус 2 процента, напряжения начинают приближаться к пределу текучести, и возникают необратимые пластические деформации, это позволяет предсказывать опасные состояния объекта контроля.

## 4 ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С УЛЬТРАЗВУКОМ

### 4.1 Источники, классификация и характеристика ультразвука

Источником ультразвуковых волн является:

- производственное оборудование, которое генерирует ультразвуковые колебания для выполнения технологических процессов, контроля и измерений;
- производственное оборудование, при эксплуатации которого ультразвук возникает как сопутствующий фактор.

По частотному составу ультразвуковой диапазон подразделяется на:

- низкочастотный – от  $1,2 \cdot 10^4$  до  $1,0 \cdot 10^5$  Гц;
- высокочастотный – от  $1,0 \cdot 10^5$  до  $1,0 \cdot 10^9$  Гц.

По способу распространения ультразвук подразделяется на:

- распространяющийся воздушным путем;
- распространяющийся контактным путем при соприкосновении с твердыми и жидкими средами.

### 4.2 Нормирование ультразвука

Согласно ГОСТ 12.1.001-89 «Ультразвук. Общие требования безопасности», СН 9-88 РБ 98 «Ультразвук, передающийся контактным путем. Предельно допустимые уровни на рабочих местах», СН 9-87 РБ 98 «Ультразвук, передающийся воздушным путем. Предельно допустимые уровни на рабочих местах» и СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» нормируемыми параметрами воздушного ультразвука на рабочих местах являются уровни звукового давления в децибелах в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 12,5, 16, 20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 80, 100 кГц, которые определяются по формуле

$$L = 20 \lg p / p_0, \quad (30)$$

где  $L$  – уровень звукового давления, дБ;

$p$  – среднее квадратическое значение звукового давления в определенной полосе частот, Па;

$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па – исходное значение звукового давления в воздухе.

Допустимые уровни звукового давления на рабочих местах не должны превышать значений, приведенных в таблице 5.

Таблица 5 – Предельно допустимые уровни звукового давления воздушного ультразвука на рабочих местах

Среднегеометрические частоты третьоктавных полос, кГц	Уровень звукового давления, дБ
12,5	80
16	90
20	100
25	105
31,5 – 100,0	110

#### 4.3 Методы измерения и контроля ультразвука на рабочих местах

Контроль уровней ультразвука на рабочем месте проводят для установления соответствия фактических уровней ультразвука на рабочих местах допустимым (не реже одного раза в год) и для разработки и определения эффективности мероприятий по защите от ультразвука. Контроль уровней ультразвуковых колебаний на рабочих местах производственного оборудования, генерирующие ультразвук, следует проводить в нормируемом частотном диапазоне с верхней граничной частотой не ниже рабочей частоты этого оборудования. Точки измерения воздушного ультразвука на рабочем месте должны быть расположены на высоте 1,5 м от уровня основания (пола, площадки), на котором при выполнении работы стоит работник, или на уровне его головы, если работа выполняется сидя, на расстоянии 5 см от уха и на расстоянии не менее 50 см от человека, проводящего измерения.

Измерения необходимо выполнять не менее трех раз в каждой третьоктавной полосе для одной точки и затем вычислять среднее значение. Результаты измерений должны характеризовать воздействие ультразвука за время рабо-



чей смены. Измерение уровней контактного ультразвука в зоне контакта с твердой средой следует проводить в зоне максимальных амплитуд колебаний.

#### **4.4 Методы защиты от ультразвука**

Согласно СанПиН 2.2.4/2.1.8.582-96 для защиты, персонала, обслуживающего источники ультразвука, необходимо применять:

- дистанционное управление ультразвуковым оборудованием;
- блокировки, обеспечивающие автоматическое отключение источников ультразвука при выполнении вспомогательных операций (загрузке и выгрузке продукции, нанесении контактных смазок и т. д.);
- приспособления для удержания источника ультразвука или обрабатываемой детали (для защиты рук от контактного действия ультразвука);
- использование по возможности маломощного оборудования, что способствует снижению интенсивности шума и ультразвука на рабочих местах на 20-40 дБ;
- размещение оборудования в звукоизолированных помещениях или кабинетах с дистанционным управлением.

Для защиты работников от неблагоприятного воздействия воздушного ультразвука согласно СанПиН 2.2.4/2.1.8.582-96 следует применять средства индивидуальной защиты. Для защиты рук от возможного неблагоприятного воздействия контактного ультразвука в твердой или жидкой средах необходимо применять нарукавники, рукавицы или перчатки (наружные резиновые и внутренние хлопчатобумажные).

К работе с источниками ультразвука допускаются лица не моложе 18 лет, имеющие соответствующую квалификацию, прошедшие обучение и инструктаж по технике безопасности.

К мерам организационного плана относятся соблюдение режима труда и отдыха, запрещение сверхурочных работ. При контакте с ультразвуком более 50 % рабочего времени рекомендуются перерывы продолжительностью 15 мин через каждые 1,5 ч работы.

## 5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данном разделе выпускной квалификационной работы производится расчет затрат на проведение напряженно-деформированного состояния транспортно-установочного агрегата, моделирование неразрушающего контроля.

Возможна два пути развития: организация самостоятельно проводит все расчеты, либо прибегает к помощи сторонних компаний.

Составим смету затрат на проведение самостоятельных расчетов.

Таблица 6 – Смета затрат и краткое описание затрат

Наименование затрат	Стоимость, рублей	Описание
1 Лицензия SolidWorks 2020 Standart	471240	<p>Артикул: SWN0029N                      Тип поставки: Электронная (e-mail)                      Язык (версия): Английский                      Срок поставки лицензионной программы или ключа активации: 10 рабочих дней                      Рекомендуется дополнительно приобретать подписку Subscription Services на 1 год.                      Тип лицензии: Постоянная                      Доступна оплата картой.</p>
2 Лицензия Comsol Multiphysics 5.6	699500	<p>Тип поставки: Электронная (e-mail)                      Язык (версия): Английский                      Срок поставки лицензионной программы или ключа активации: 20 рабочих дней                      Тип лицензии: Постоянная</p>
3.1 Курсы обучения при работе с SOLIDWORKS: Simulation Standard + базовый курс	15500	<p>Курс длится 3 дня (21 астрономический час). Он включает в себя: основы моделирования деталей, знакомство с интерфейсами и настройками твердотельный оболочечные и балочные конечные элементы настройки генераторов сетки создание и решения линейных статистических исследований с различными граничными условиями контактные задачи в сборках исследования проектирования термоупругости численные результаты характеристик НДС диаграммы эпюры</p>
3.2 Курсы обучения при работе с Comsol Multiphysics 5.6	36000	<p>Курс длится 2 дня (10 академических часов). В рамках учебного курса будет представлен обзор возможностей COMSOL Multiphysics 5.6 в области решения задач механики деформируемого твердого тела, а также задач ультразвукового контроля. Будут рассмотрены различные виды анализа, в том числе стационарный, динамический и параметрический, и продемонстрируем широкий спектр.</p>

Продолжение таблицы 6

		задач механики конструкций, которые можно решать с помощью COMSOL Multiphysics
3.3 Самостоятельное обучение	0	Изучение различного материала, который находится в открытом доступе
4 Основная заработная инженеру по эксплуатации (включает в себя разработку методических указаний по УЗК)	56550	<p>Расчет зарплаты инженера по эксплуатации будем производить по формуле, которая учитывает оклад работника,</p> $з/п = \frac{\text{Оклад} \cdot \text{КОД}}{\text{КРД}} \cdot k_p,$ <p>где з/п – заработная плата, начисляемая работнику за месяц, КРД – количество рабочих дней (например, 15), КОД – количество дней отработанных сотрудником в расчетном месяце (например, 15), <math>k_p</math> – районный коэффициент (для Свободненского района равен 1,3)</p> <p>В среднем оклад инженера по эксплуатации составляет 50000 рублей. Тогда заработная плата составит <math>50000 \cdot 1,3 = 65000</math> рублей. С учетом НДФЛ</p> $з/п = 65000 - \left( \frac{65000 \cdot 13\%}{100\%} \right) = 56550 \text{ рублей}$
Итого (с учетом 3.1 и 3.2) первый месяц/ последующие месяцы	1278790/56550	
Итого (без учета 3.1 и 3.2)/ последующие месяцы	1227290/56550	

Далее был осуществлен поиск организаций по проведению инженерных расчетов. Этим компаниям задавался следующий ряд вопросов:

- 1) Какова стоимость создание 3д модели платформы ТУА;
- 2) Какова стоимость проведения статического исследования данной 3д модели;
- 3) Какова стоимость проведения моделирования НК при помощи УЗК.

Ниже приведена краткая характеристика организаций по инженерным расчетам и стоимость услуг.

Таблица 7 – Вид деятельности инженерных компаний

Название организации	Описание
Центр инженерно-физических расчетов и анализа (АО «ЦИФРА»)	Для математического моделирования и выполнения инженерных расчетов компания использует коммерческие лицензии на программные продукты Ansys текущей версии. Тип нашей задачи компания отнесла как к уникальным задачам (499000 рублей) (сборки без ограничений, быстропротекающие процессы, задачи без ограничений, создание расчетных методик) и за каждый час работы компания берет 3500 рублей. Рассчитанная сумма уйдет только в первый месяц работы. Дальше стоимость услуг будет зависеть от количества создания акустических моделей для УЗК.
НТЦ АПМ (Научно-технический центр автоматизированного проектирования машин)	Комплекс программ АРМ создан для проектирования и расчетов деталей машин, анализа напряженно-деформированного состояния конструкций и их элементов и проведения ряда сложных инженерных расчетов. Своевременное использование инженерных расчетов позволяет существенно сократить затраты на опытные образцы, снизить издержки и устранить риски.
КБ ИнженерГрупп	Компания выполняет инженерные расчеты, прочностные статические и динамические исследования (линейные и нелинейные) используя метода конечных элементов (МКЭ), которые включают в себя: статический расчет, прогнозирование многоциклового усталостного разрушения, расчёт резонансных форм и частот, расчёт форм и нагрузок потери устойчивости в линейной постановке, тепловой расчёт без учёта движения среды. Для расчета использует САПР Comsol Multiphysics 5.6

Таблица 8 – Стоимость услуг организаций по инженерным расчетам

Наименование организации	Стоимость услуги построение 3д модели	Стоимость услуги проведения статического исследования	Стоимость услуги для моделирования УЗК и составления методических указаний	Итого
Центр инженерно-физических расчетов и анализа (АО «ЦИФРА»)	$499000 + (80 \cdot 3500) = 779000$ рублей	$2 \cdot 3500 = 7000$ рублей	$4 \cdot 3500 = 14000$ рублей	800000 рублей
НТЦ АПМ (Научно-технический центр автоматизированного проектирования машин)	150000 рублей	50000 рублей	данная услуга отсутствует	200000 рублей
КБ ИнженерГрупп	4500000 рублей	150000 рублей	данная услуга отсутствует	600000 рублей

Как мы видим, из выше перечисленных компаний, с нашей поставленной задачей сможет справиться только центр инженерно-физических расчетов и

анализа (АО «ЦИФРА»). Но для каждого нового исследования придется заказывать расчеты этой компании. Срок выполнения работ АО «ЦИФРА» от 4 дней до 2 недель.

Опираясь на совокупность всех ранее вышеперечисленных и упомянутых факторов можно сделать вывод, что лучше самостоятельно проводить инженерные расчеты, иначе приходится заказывать работы у сторонних организаций за большую сумму. Имея своего человека в штате, есть возможность проводить расчеты не только платформы ТУА, но и других объектов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы было рассмотрено напряженно-деформированного состояния транспортно-установочного агрегата и выявлена самая опасная деталь, в которой максимальное напряжение составило 7,352 МПа, максимальное перемещение составило  $4,164 \cdot 10^{-2}$  мм, максимальная деформация составила  $1,848 \cdot 10^{-5}$  мм. Также было установлено, что платформа ТУА выдерживает все приложенные нагрузки, так как рассчитанное опасное напряжение  $\sigma_{\text{lim}} = 7,352 \text{ МПа}$  для стали 10ХСНД меньше допускаемого напряжения  $[\sigma] = 490 \text{ МПа}$ .

С помощью численного решения волновых уравнений проанализировано распространение ультразвуковых волн в объекте контроля с имитацией дефекта. Методы распространения ультразвука в детали с зазором и без него показали точные результаты, погрешности определения координат составили 3,1, 0,5 и 5 процентов, соответственно. Представленные методики расчета НК можно использовать для накопления базы данных сигналов от различных типов дефектов ТУА.

При проведении НК методом акустоупругости было выявлено, что когда происходит изменение скорости поперечных волн на минус 2 процента, напряжения начинают приближаться к пределу текучести, и возникают необратимые пластические деформации, это позволяет предсказывать опасные состояния объекта контроля.

Были рассчитаны затраты на проведение НДС и моделирование НК и выбрана оптимальная смета затрат на реализацию данных мероприятий. Суммарная стоимость выполнения работ в первый месяц составляет 1278790/1227290 рублей, а в последующие месяцы 56550 рублей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Сыч, Т. В. Моделирование распространения акустических волн методом конечных элементов / Сыч, Т. В. Герасимов, С. И. Кулешов, В. К. – Дефектоскопия, 2012. № 3. С. 3-9.

2 Петров, А. А. Моделирование ультразвукового контроля дефектоскопом с фазированной антенной решеткой / Петров, А. А. Быков, Д. А. – Вестник Московского энергетического института, 2013. № 5. С. 83-87.

3 Авдеев, Д. А. Моделирование распространения ультразвука в твердых телах различной формы / Авдеев, Д. А. Римлянд, В. И. – Информатика и системы управления, 2015. № 2 (44). С. 15-22.

4 Молоканов, Б. М. Конечно-элементное моделирование распространения ультразвука в Comsol Multiphysics / Молоканов, Б. М. Драчёв, К. А. Римлянд, В. И. – Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование, 2018. С. 137-140.

5 Беляева, З. В. Расчет и проектирование элементов металлических конструкций: учебно-методическое пособие / Беляева, З. В. Кудрявцев, С. В. – Издательство Уральского университета, 2019 – 140 с.

6 Рудаченко, А.В. Исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов: учебное пособие / Рудаченко, А.В. – Издательство Томского политехнического университета, 2011 – 136 с.

7 Родимов Г.А. Влияние ультразвуковых колебаний на изменение механических характеристик поверхностей контакта: статья Самарского государственного технического университета / Родимов, Г.А. Батищева, О.М. – Издательство Самарского государственного технического университета, 2013 – 3 с.

8 Клубович В. В. Исследование сопротивления материалов пластическому деформированию при их обработке давлением с наложением ультразвуковых колебаний / Клубович, В. В. – Вестник БНТУ, № 1, 2006 – 5 с.

9 Работа элементов металлических конструкций и основы расчета их надежности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cdo.bru.by/course>

/distan/PGS/metallicheskie\_konstrukzii\_8sem\_pgsdz/Fail/lekcher\_2.pdf. (Дата обращения: 18.01.2021)

10 Писаренко, Г.С. Сопротивление материалов: учебник для вузов / Писаренко, Г.С. – Головное издательство, 1979 – 696 с.

11 Мукушев, Ш.К. Расчет и проектирование металлоконструкций подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие для курсового проектирования / Мукушев, Ш.К. Байбисенова, А.А. Гамалий, Д.А. – СибАДИ, 2019. – Режим доступа: [https://portal.sibadi.org/pluginfile.php/126797/mod\\_resource/content/1/Учеб.пособие%20СМ%20иМК%20СДМ.pdf](https://portal.sibadi.org/pluginfile.php/126797/mod_resource/content/1/Учеб.пособие%20СМ%20иМК%20СДМ.pdf) (Дата обращения: 24.04.2021).

12 Уланов, А. М. Основы метода конечных элементов: лекции / Уланов, А. М – Издательство СГАУ, 2011 – 19 с.

13 Основы ультразвукового контроля [Электронный ресурс]: конспект лекций – Режим доступа: [https://www.acndt.ru/download/osnovi\\_ultrazvukovogo\\_kontrolya.pdf](https://www.acndt.ru/download/osnovi_ultrazvukovogo_kontrolya.pdf) (Дата обращения: 11.05.2021).