

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 2022 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Разработка системы мониторинга подъемного устройства с использованием ультразвуковой диагностики

Исполнитель
студент группы 817-об

 08.06.2022 г.
(подпись, дата)

К.А. Жуков

Руководитель
доцент, канд. тех. наук

 08.06.2022 г.
(подпись, дата)

В.В. Соловьев

Консультант по БЖД:
доцент, канд. тех. наук

 08.06.2022 г.
(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль
ассистент кафедры СиТРК

 08.06.2022 г.
(подпись, дата)

М.А. Аревков

Благовещенск 2022

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

В. В. Соловьев

«28» мая 2022 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Жукова Кирилла Александровича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка системы мониторинга подъемного устройства с использованием ультразвуковой диагностики.

учреждена приказом от 05.04.2022 № 679-уч

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 08.06.2022г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: отчеты по практикам, ГОСТы, справочная литература.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): определение напряженно–деформированного состояния в программе SolidWorks, определение напряженно–деформированного состояния с использованием тензодатчиков и пьезопреобразователей, оценка адекватности модели, безопасность жизнедеятельности, экономическая часть.

5. Перечень материалов приложения: титульный лист, цель и задачи работы, блок – схема «Последовательность создания сетки подъемного устройства», аналитический расчет НДС конструкции для определения угла наклона стрелы при котором возникают максимальные по величине напряжения, принципиальная электрическая схема и модель подключения системы для сбора данных с тензодатчиков, схема нагружения образца и оптимальное расположение тензодатчиков на его поверхности, экспериментальное

исследование напряженно-деформированного состояния с использованием тензодатчиков, экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния с использованием УЗД, оценка адекватности модели трех экспериментов, заключение.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов): БЖД Козырь Аркадий Валентинович, доцент, канд. тех. наук.

7. Дата выдачи задания 26.05.2022г.

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

Задание принял к исполнению (дата) 26.05.2022 

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 75 с., 45 рисунков, 7 таблиц, 1 приложение, 17 источников.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА, УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД, ПОДЪЕМНОЕ УСТРОЙСТВО, НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, ПРИЛОЖЕНИЕ НАГРУЗОК, ПЕРВЫЙ БЛОК, КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ, ТЕНЗОДАТЧИК, АКУСТОУПРУГОСТЬ

В работе рассмотрены основные методы мониторинга с использованием ультразвуковой диагностики, а также принципы построения существующих систем мониторинга, работа которых базируется на использовании данных методов контроля.

Цель работы – проектировка системы мониторинга напряженно–деформированного состояния подъемного устройства СГУ–АТРГ–ГПМ с использованием УЗД.

В основе методологии такого рода исследований лежит эффект акустоупругости. На его основании и была разработана система мониторинга исследуемой конструкции.

СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	8
Введение	9
1 Описание методов мониторинга с использованием УЗД.....	11
1.1 Общие сведения о методе неразрушающего контроля	11
1.2 Основные методы мониторинга при помощи УЗД.....	12
1.2.1 Активные методы АК.....	13
1.2.1.1 Методы прохождения	13
1.2.1.1.1 Амплитудный теневой метод	13
1.2.1.1.2 Временной теневой метод	14
1.2.1.1.3 Велосиметрический метод.....	14
1.2.1.2 Методы отражения	15
1.2.1.2.1 Эхометод.....	15
1.2.1.2.2 Эхозеркальный метод	16
1.2.1.2.3 Дельта–метод.....	17
1.2.1.2.4 Метод многократных отражений	17
1.2.1.3 Импедансный метод	18
1.2.1.4 Метод собственных частот (колебаний).....	18
1.2.1.5 Комбинированные методы	20
1.2.1.5.1 Зеркально–теневой метод контроля.....	20
1.2.1.5.2 Эхотеневой метод.....	20
1.2.1.5.3 Эхосквозной метод.....	21
1.2.2 Пассивные методы НК	21
1.2.2.1 Акустико–эмиссионный метод	21
1.2.2.2 Вибродиагностика	22
1.2.2.3 Шумодиагностика.....	22
2 Состав и структура информационно–измерительной системы мониторинга	23

2.1 Проводной и беспроводной способы передачи данных.....	24
2.2 Компоненты системы мониторинга	26
2.3 Информационно–измерительная система контроля напряженно–деформированных состояний	27
3 Моделирование подъемного устройства и определение НДС его самой нагруженной части	32
3.1 Порядок проведения исследования в среде SolidWorks.....	33
3.2 Выявление наиболее уязвимой части конструкции и определение угла наклона при котором возникают максимальные по величине напряжения	36
3.3 Анализ напряженно–деформированного состояния первого блока под углом 0 градусов.....	44
4 Методика определения НДС нагруженной части конструкции опытным путем с использованием тензодатчиков	46
4.1 Подбор необходимых компонентов и моделирование схемы подключения.....	47
4.2 Проектирование схемы нагружения образца для тарировки датчиков изгиба.....	48
4.3 Выбор оптимального расположения датчиков на поверхности образца ..	50
4.4 Экспериментальное исследование образца.....	51
5 Построение системы мониторинга с использованием метода акустоупругости и оценка адекватности модели трех экспериментов	56
5.1 Система мониторинга с использованием акустоупругости	56
5.2 Оценка адекватности модели трех экспериментов.....	63
6 Безопасность жизнедеятельности.....	65
6.1 Гигиеническая классификация ультразвука и его нормирование	65
6.2 Общие требования безопасности, предъявляемые во время работы с ультразвуком.....	66
6.3 Средства индивидуальной защиты, необходимые для проведения ультразвукового контроля	68
7 Экономическая часть	69

7.1 Затраты на определение НДС агрегата в программе SolidWorks	69
7.2 Затраты на определение НДС конструкции с использованием УЗД.....	70
Заключение	72
Библиографический список	74
Приложение А	76

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

УЗД – ультразвуковой контроль;

ПО – программное обеспечение;

НДС – напряженно-деформированное состояние;

НК – неразрушающий контроль;

ОК – объект контроля;

АК – акустический контроль;

СМИС – система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений;

ЦУ – центральное устройство;

СУБД – система управления базой данных;

ИИС – информационно-измерительная система;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь;

СИЗ – средства индивидуальной защиты.

ВВЕДЕНИЕ

Система мониторинга различных конструкций, зданий и сооружений в первую очередь предназначена для оповещения рабочего персонала о переходном состоянии объекта контроля с нормального (рабочего) состояния в ограниченно работоспособное или критическое состояние. Такая система позволяет предотвращать аварийные ситуации при выходе конструкции из строя, которые могут влечь за собой большие экономические затраты или даже гибель людей.

Также одной из немаловажных задач, которую позволяет решать система такого рода, является увеличение сроков межремонтных работ. То есть ремонтные работы проводятся не по определенному запланированному графику, а исходя из анализа технического состояния, результаты которого получают с использованием специальных устройств системы мониторинга.

В большинстве случаев система мониторинга включает в свой состав неразрушающий контроль, то есть контроль объекта происходит с использованием ультразвуковой диагностики. УЗД позволяет исследовать конструкцию на наличие дефектов, а также определять его предел прочности без нарушения целостности объекта контроля.

Цель работы – проектировка системы мониторинга подъемного устройства для определения напряженно–деформированного состояния с использованием УЗД.

Для осуществления поставленной цели потребуется решение следующих задач:

- спроектировать 3D модель подъемного устройства в программе SolidWorks;
- провести исследование напряженно–деформированного состояния стрелы подъемного устройства;
- проанализировать НДС конструкции с применением тензодатчиков;

- построить систему мониторинга с использованием ультразвукового контроля и провести соответствующий анализ на определение НДС;
- оценить адекватность модели экспериментов;
- рассчитать экономические затраты на проектировку системы мониторинга агрегата.

1 ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЗД

1.1 Общие сведения о методе неразрушающего контроля

Методы неразрушающего контроля (дефектоскопия) – это методы, которые используются для мониторинга различных объектов, главной целью данного процесса является выявление наличия или отсутствия в них дефектов, которые могут стать причиной поломки и как следствие выхода из строя всей конструкции в целом.

Ссылаясь на ГОСТ 18353–79, основные методы НК подразделяются на: тепловой, магнитный, оптический, вихретоковый, радиационный, радиоволновой, электрический, акустический.

Рассмотрим последний метод НК – акустический или ультразвуковой метод.

Использование методов УЗД позволяет получить необходимую информацию о дефектах, расположенных на различной глубине, в изделиях с различным материалом. В отличие от остальных методов НК, ультразвуковая дефектоскопия имеет ряд важных преимуществ, например: доступная стоимость, мобильность метода (портативные аппараты для УЗД позволяют осуществлять анализ состояния конструкции на выезде), высокая точность метода (дает возможность получить данные о состоянии и качестве конструкции без значительных погрешностей, а также имеет высокую чувствительность к мелким трещинам и иным незначительным деформациям, которые в процессе эксплуатации представляют собой большую опасность для всей конструкции) [1].

Также применение методов неразрушающего контроля при эксплуатации агрегата приводит к:

- увеличению точности измерений, определяющих техническое состояние наиболее нагруженных и ответственных частей объекта контроля;

- снижению интенсивности отказов и как следствие уменьшению вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций;

К основным недостаткам относятся: необходимость тщательной подготовки поверхности перед исследованием объекта, определенные требования к необходимому классу шероховатости поверхности, влияние текстуры материала, его фазового состава и остаточных напряжений на скорость распространения ультразвуковой волны.

1.2 Основные методы мониторинга при помощи УЗД

Акустические (ультразвуковые) методы контроля – это методы, в основе которых лежит использование упругих колебаний (ультразвуковых волн) в достаточно широком диапазоне частот, возникающих в исследуемом объекте.

Исходя из ГОСТа 23829–79, на данный момент существует два вида акустических методов – это группа активных и пассивных методов. Первая из приведенных групп основывается как на излучении ультразвуковых волн, так и их приеме, что касается пассивных методов, в них происходит только прием упругих волн, возникающих непосредственно в объекте контроля при протекании в нем различных физических процессов [1].

В описанных выше группах можно выделить несколько подгрупп методик проведения акустического контроля. Итак, активные методы АК содержат в своем составе методы отражения волн, прохождения, а также комбинированные, которые основываются на принципах метода прохождения и в то же время отражения. Также в эту группу входят методы собственных частот (вынужденных и свободных колебаний) и импедансные методы.

Вторая группа (пассивные методы) делится на: акустико-эмиссионный метод и шумодиагностический.



Рисунок 1.1 – Блок–схема классификации акустических методов НК

1.2.1 Активные методы АК

1.2.1.1 Методы прохождения

Данные методы основываются на возбуждении в исследуемом объекте ультразвуковых волн и изучении свойств этих волн, которые прошли через рассматриваемое изделие. Для проведения контроля методами прохождения, как правило необходимо наличие излучающего и приемного преобразователя, которые располагаются по обе стороны (напротив друг друга) относительно исследуемого объекта. Получение необходимой информации происходит в результате измерения параметров сигнала, прошедшего сквозь исследуемый объект от излучающего преобразователя к приемному.

1.2.1.1.1 Амплитудный теневой метод

Рассматриваемый метод основывается на регистрации затухания волны (уменьшения амплитуды волны), прошедшей сквозь исследуемый объект. Данный эффект затухания происходит из-за наличия дефекта в изделии, который препятствует прохождению сигнала и создает так называемую звуковую тень. Приборами для создания акустических колебаний в данном методе служат излучатель и приемник, расположенные противоположно друг другу относительно контролируемого образца. Информативным параметром

метода является амплитуда сквозного сигнала, режим излучения – непрерывный.

В большинстве случаев, амплитудный теневой метод применяется для исследования изделий малой и средней толщины, например резиновые изделия или различные виды стеклопластиков, графита, бетона.

1.2.1.1.2 Временной теневой метод

Суть метода заключается в измерении времени задержки импульса волны, причиной задержки является наличие дефекта в исследуемом образце.

Как и в амплитудном методе, приборами для создания акустических колебаний служат излучатель и приемник, которые расположены относительно образца противоположно друг другу. Упругая волна, проходя через изделие, сталкивается с таким препятствием как дефект, который она вынуждена огибать и затрачивать на это некоторое количество времени. Информативной характеристикой метода является время прохождения импульса через объект, режим излучения – импульсный.

Временной теневой метод получил широкое применение при исследовании материалов с большим рассеиванием ультразвука, где требуется определить дефекты крупных размеров, к таким материалам относят: огнеупорный кирпич, бетон, древесина.

1.2.1.1.3 Велосиметрический метод

Метод основывается на анализе изменения скорости волны в той части изделия, где находится дефект. При распространении изгибной волны в материале, скорость этой волны будет непосредственно зависеть от толщины слоя. В свою очередь, наличие дефекта будет приводить к изменению толщины слоя контролируемого объекта, тем самым вызывая фазовое и групповое изменение скорости волны.

Для осуществления данного метода необходимо наличие генератора, целью которого является подача электрического сигнала, излучатель, который возбуждает ультразвуковую волну в образце и приемник, преобразующий

ультразвуковую волну в электрические колебания, поступающие в блок измерения после их усиления.

Информативным параметром метода является изменение фазы сигнала, режим излучения – непрерывный.

Велосиметрический метод активно используется для обнаружения дефектов в многослойных конструкциях или изделиях из полимерных композиционных материалов на глубине не более 25 мм.

1.2.1.2 Методы отражения

Суть таких методов заключается в исследовании сигналов, которые в случае нахождения в ОК дефектов отражаются от них.

Методы отражения используют такие информативные параметры как: амплитуда волны (несет в себе информацию о размере дефекта), время за которое сигнал поступает на преобразователь (содержит информацию о глубине залегания дефекта).

1.2.1.2.1 Эхометод

Эхометод – метод, который основывается на приеме эхосигналов, отраженных от различных несплошностей контролируемого объекта.

Упругие волны, проходя через объект контроля отражаются от противоположной поверхности объекта, а также от различных дефектов, если таковые имеются. При этом на экране ультразвукового дефектоскопа будет получена информация двух типов: время пробега импульса в исследуемом объекте – горизонтальная линия или линия развертки и амплитуда эхосигналов – ей соответствует вертикальная линия.

При проведении контроля данным методом, эхосигнал от дефекта будет приходиться на преобразователь раньше донного сигнала, за счет этого его амплитуда как правило значительно меньше.

Амплитуда и время прихода эхосигнала являются основными параметрами, по которым можно определить отражательную способность дефекта (амплитуда пропорциональна его эквивалентной площади) и глубину залегания соответственно.

Эхометод является самым распространенным среди акустических методов контроля, он прост в использовании, имеет неплохую чувствительность к дефектам, есть возможность для контроля разного рода материалов, а также определения координат дефектов с достаточно высокой точностью. Еще одной немаловажной особенностью метода является не только поиск дефектов в ОК, но и определение напряженно-деформированного состояния на основе эффекта акустической упругости, прозвучивание объекта может быть выполнено как контактным так и бесконтактным способом, в зависимости от используемых преобразователей.

1.2.1.2 Эхозеркальный метод

Данный метод основывается на анализе сигнала, который отражается как от несплошности так и от донной поверхности исследуемого объекта. Эхозеркальный метод можно провести двумя способами, первый из них так называемый метод «тандем», предназначен для выявления дефектов вертикальной ориентации. Для его реализации необходимо наличие пары наклонных преобразователей, один из которых излучает сигнал, а другой служит его приемником. Прозвучивание шва осуществляется перемещением преобразователей по поверхности околошовной зоны, при этом оба преобразователя находятся по одну сторону от объекта контроля.

Еще одной разновидностью эхозеркального метода является «К-метод». Для его осуществления также необходимо иметь два наклонных преобразователя, но в отличие от первого метода, ПЭП располагаются противоположно друг другу относительно ОК.

Суть метода заключается опять же в поиске вертикально ориентированных дефектов, при котором сохраняется принцип отражения от несплошности и дна объекта контроля. Но главной особенностью является то, что метод «тандем» не всегда применим, так как преобразователи в процессе контроля слишком близко сближаются и мешают друг другу, при реализации «К-метода» такого не происходит, следовательно, если дефектоскопист имеет

двухсторонний доступ к исследуемому объекту, то целесообразнее применить именно этот метод контроля.

1.2.1.2.3 Дельта–метод

Дельта–метод основывается на таком явлении как дифракция волн на несплошности.

Для реализации метода необходимо наличие двух преобразователей, один из которых является излучателем (наклонный преобразователь), а другой приемником (прямой преобразователь). В свою очередь наклонный преобразователь возбуждает поперечную волну в контролируемом объекте, волна, сталкиваясь с дефектом трансформируется из поперечной в продольную. Далее прямой преобразователь улавливает два сигнала, первый сигнал приходит от верхнего края несплошности, второй приходит позже так как отражается от ее нижнего края и от донной поверхности изделия.

Основными параметрами, согласно которым можно описать тот или иной дефект выступают – амплитуда продольной волны, характеризующая величину дефекта (степень его опасности) и запаздывание импульса, который приходит от нижнего края несплошности, относительно импульса от ее верхнего края, что говорит о протяженности найденного дефекта. Режим излучения данного метода контроля – импульсный.

Дельта–метод хорошо применим для обнаружения несплошностей, имеющих вертикальную ориентацию.

Главными недостатками считаются: достаточно сложная схема сканирования, трудоемкая настройка чувствительности и сложная расшифровка сигналов при сканировании изделия толщиной 15 мм и менее.

1.2.1.2.4 Метод многократных отражений

Метод многократных отражений (реверберационный метод), основывается на таком явлении как реверберация упругих волн, то есть постепенном ослабевании ультразвука при его многократных отражениях в некотором объеме объекта контроля. Такими объектами являются многослойные конструкции, например типа металл–пластик.

Для проведения контроля необходимо наличие прямого преобразователя, который в свою очередь выполняет функции излучателя и приемника. При продольном перемещении ПЭП по поверхности изделия будут получены данные о времени ослабления импульсов или иначе говоря о времени объемной реверберации. Если многослойная конструкция имеет качественное соединение материалов из которых она состоит, то ультразвуковые колебания без проблем будут переходить от одного слоя к другому, при этом время реверберации будет небольшим. В противном случае при наличии несплошности будет наблюдаться увеличение реверберации, что напрямую связано с потерей энергии ультразвуковых колебаний при переходе между слоями конструкции.

1.2.1.3 Импедансный метод

Импедансный метод основывается на исследовании режима продольных колебаний стержня (преобразователя), который опирается на поверхность объекта контроля.

Суть метода заключается в перемещении преобразователя по поверхности многослойного изделия, при этом, если стержень находится над участком, не имеющим непроклеи, непропаи, расслоения и другие дефекты, то будет наблюдаться максимальная величина механического импеданса. Наличие же дефекта приведет к изменению площади контакта преобразователя с поверхностью исследуемого объекта, что повлияет на величину модуля механического импеданса изделия.

Изменение величины механического импеданса объекта контроля определяют по нескольким параметрам: изменение фазы, амплитуды и частоты колебания стержня.

Данный метод в основном используется для контроля клеевых соединений, но он также применим и для мониторинга качества паяных соединений, посадки штифтов, шпилек и других деталей.

1.2.1.4 Метод собственных частот (колебаний)

Метод собственных частот основывается на возбуждении в исследуемом объекте свободных или вынужденных колебаний.

Что касается свободных колебаний, то их создают благодаря кратковременному воздействию на исследуемый объект, к примеру это может быть механический удар, после которого изделие свободно колеблется.

Вынужденные колебания возбуждают путем обеспечения постоянной связи исследуемого объекта с генератором через преобразователь, при этом частоту генератора постепенно изменяют в процессе контроля.

Также данный метод делится на две подгруппы: интегральные и локальные методы контроля. Благодаря интегральным методам есть возможность для исследования собственных частоты всего ОК в целом, что касается локальных методов, то они позволяют определить этот параметр только для отдельного участка изделия.

Интегральные методы свободных и вынужденных колебаний используют для исследования физико–механических свойств ОК, определения наличия или отсутствия дефектов, а также геометрических размеров контролируемого изделия, например его толщины.

Локальный метод свободных колебаний используется для контроля многослойных изделий, путем механического воздействия на ОК, в результате которого происходит изменение спектра частот на его определенном участке.

Локальный метод вынужденных колебаний (резонансный метод), используется для проведения контроля объектов небольшой толщины с целью выявления коррозионных дефектов, различных несплошностей материала, а также измерения толщины резервуаров, труб и так далее.

Для его осуществления используется совмещенный преобразователь, который излучает и в то же время улавливает ультразвуковые колебания. Резонанс возникает в результате совпадения возбужденных и собственных частот объекта контроля. В процессе контроля исчезновение резонансов будет указывать на наличие дефекта, причем расположенного под углом к поверхности исследуемого объекта, если при контроле наблюдается изменение частот резонансов, то дефект имеет параллельное расположение к поверхности изделия.

1.2.1.5 Комбинированные методы

Данные методы контроля одновременно базируются на принципах метода прохождения и отражения. Результатом такого сочетания методов послужило повышение достоверности контроля.

1.2.1.5.1 Зеркально–теневой метод контроля

Принципом зеркально-теневого метода служит измерение амплитуды отраженного сигнала от донной поверхности контролируемого изделия.

При проведении контроля используются преобразователи наклонного типа, один преобразователь излучает сигнал, а другой его фиксирует, то есть техника выполнения идентична методу отражения. Также измеряется ослабление донного сигнала из–за наличия дефекта, что по сути относится к теневому методу.

Наклонные преобразователи хорошо применимы в данном случае, так как при контроле объекта небольшой толщины не будет возникать проблем с получением донного сигнала, используя же обычные прямые преобразователи, их мертвая зона не позволит принять сигнал от противоположной поверхности ОК.

Нередко зеркально-теневой метод используется совместно с эхометодом. Потому что при проведении контроля эхометодом не всегда удастся получить четкий эхосигнал, так как объект контроля может содержать дефекты очень маленьких размеров или ориентация их такова, что сигнал отражаясь от несплошности уходит в сторону и приемный преобразователь не может его уловить.

1.2.1.5.2 Эхотеневой метод

Суть метода заключается в исследовании прошедших и отраженных ультразвуковых волн.

Для реализации контроля понадобится два прямых преобразователя, при этом один из них подключен по так называемой совмещенной схеме как в эхометод, его задачей является излучение сигнала и его прием в случае

отражения от дефекта. Второй преобразователь располагается противоположно первому на другой стороне ОК, он улавливает прошедший сигнал.

Основополагающими параметрами по которым определяют наличие или отсутствие дефектов выступают: время за которое отраженный импульс улавливается преобразователем и значение амплитуды прошедшей и отраженной волны.

1.2.1.5.3 Эхосквозной метод

Метод заключается в анализе сигналов, отраженных от несплошностей, а также прошедших через контролируемое изделие.

При проведении контроля используются два прямых преобразователя расположенных соосно друг другу по разные стороны относительно исследуемого объекта. Один из преобразователей выполняет функцию излучателя, второй приемника.

В случае обнаружения дефекта будет наблюдаться затухание сигнала, что совпадает с принципом зеркально-теневого и теневого метода. Но в отличие от теневого, эхосквозной метод имеет большую чувствительность, что несомненно является плюсом. Еще одно преимущество – это небольшие размеры мертвой зоны, что связано с увеличением пути отраженного сигнала.

1.2.2 Пассивные методы НК

1.2.2.1 Акустико–эмиссионный метод

Рассматриваемый метод основывается на анализе акустических волн, которые излучаются в процессе изменения структуры материала исследуемого образца в результате роста трещин, фазовых превращений, наличия коррозии или всевозможных деформаций.

Процесс контроля заключается в преждевременной установке датчиков на ОК и последующего его нагружения с целью определения наличия и развития различных дефектов.

Если провести сравнение с другими методами НК, то можно сказать, что отличительной особенностью данного метода является то, что он

дистанционный и при его использовании не нужно прозвучивать поверхность контроля, требуется только правильное расположение преобразователей.

1.2.2.2 Вибродиагностика

Вибродиагностика основывается на исследовании параметров вибрации отдельных узлов объекта контроля. Контроль проводится с использованием акселерометров, которые являются приемниками контактного типа.

1.2.2.3 Шумодиагностика

Состоит в исследовании амплитудно-частотных характеристик шумов контролируемого агрегата. Мониторинг проводится с использованием специальных спектральных анализаторов.

Проанализировав существующие методы НК, можно сделать вывод, что наиболее подходящим по своим характеристикам и доступности в использовании является эхо-метод. Как говорилось ранее, его использование позволяет не только выявлять дефекты, но и проводить исследования на определение НДС конструкции в составе различных систем мониторинга, что является актуальным для решения поставленных задач данной работы.

2 СОСТАВ И СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННО–ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Мониторинг конструкций – специально разработанная процедура, состоящая из комплекса мер, которую необходимо проводить на протяжении всего времени существования агрегата: с момента начала производства и до списания с эксплуатации. Мониторинг проводится по особой программе, позволяющей оценить состояние, проанализировать происходящие внутри него процессы и своевременно выявить функциональные изменения.

Мониторинг включает 2 типа:

- статическую систему;
- динамическую систему.

В основе статической системы лежит база программно-технических средств, предназначенных для оценивания напряженно–деформированных состояний (НДС) конструкции в случае воздействия статической (постоянной) и кратковременной нагрузки в течение некоторого времени. В основе динамической же системы лежит база программно-технических средств, предназначенных для проведения оценки НДС строительной конструкции в случае воздействия динамической нагрузки [2].

И статическая, и динамическая системы имеют общие задачи:

- наблюдение и фиксация в течение всего периода использования изменений в состоянии несущей конструкции из–за появления и аккумуляции дефектов вследствие эксплуатации. Контроль важен для своевременного ремонта или списания сооружения с эксплуатации из–за дефектов, приведших к предельному состоянию;
- непрерывный сбор, передачу и анализ информации;
- обработка и предоставление формализованных опер–данных, затрагивающих функциональность технологических систем, а также

трансформацию состояний различных конструкций. Данные принимаются диспетчерской службой, отвечающей за сооружение;

- оперативное или плановое информирование о состоянии сооружения специалистов, занимающихся безопасностью сооружения.

Вместе компоненты объединяются в систему мониторинга СМИС. СМИС представляется собой систему, в основе которой лежит комплекс программ и технических средств, используемых для:

- контроля за техпроцессами и процессами, обеспечивающими работоспособность оборудования и узлов на ПОО (потенциально опасных объектах) и прочих сооружениях;

- информирования, посредством предоставления данных о состоянии сооружения, дежурно–диспетчерских подразделений с целью устранения опасных последствий накопленных дефектов и недопущения чрезвычайных ситуаций.

2.1 Проводной и беспроводной способы передачи данных

Для упрощения процедуры мониторинга система должна передавать информацию о сооружении без проведения осмотра человеком. Информация передается с помощью оптоволокну или сведения преобразовываются в цифровой вид благодаря радиочастотам в диапазоне 850–2500 Гц. То есть все данные с датчиков могут передаваться двумя способами: проводным по оптоволокну или беспроводным по радиочастотам.

Беспроводная система помимо измерительных датчиков включает сенсорный узел, который объединяет их. Узел оборудован автономным источником питания. Беспроводная система способна подавать радиосигналы не дальше 100 м. Поэтому дополнительно проводится монтаж центрального устройства (ЦУ), ответственного за хранение собранной информации для последующего анализа. По сути, центральное устройство служит своеобразной базой данных. Собранная информация постоянно анализируется и при возникновении опасных ситуаций (предельных состояний) система оповещает тревожным сигналом диспетчерские службы. Центральное устройство

выполняет координирующие функции, сохраняя работоспособность всей системы. Например, проводит настройку подключенных датчиков или занимается перепрограммированием. Центральное устройство состоит из двух обязательных компонентов: компьютера с автономным питанием и программного обеспечения [2].

Система мониторинга, работающая на проводной передаче данных, в своей основе имеет веерную структуру. Где датчики–измерители соединяются оптоволоконными проводами в единую систему с центральным сервером.

Основное эксплуатационное преимущество беспроводных систем в их быстром монтаже, не требующем подключения проводов. Но отсюда возникает и недостаток – система требует регулярной замены элементов питания (батарей, аккумуляторов). В среднем 1 батарея беспроводной системы рассчитана на несколько месяцев использования. Для увеличения срока службы элементов питания в последнее время стали использовать специально разработанные алгоритмы, позволяющие снизить энергопотребление системой без снижения функциональности. Но пока что удовлетворительного решения найдено не было. Поэтому возникают проблематичные случаи, когда требуется заменить элемент питания в труднодоступном месте. Также беспроводная система имеет еще один недостаток – помехи окружающей среды при передаче, приводящие к утере части передаваемых данных. Плюс, максимальное расстояние, на которое беспроводные системы способны передавать сигналы, в среднем 30–70 м, что естественно накладывает рамки на их использование.

Частично проблему периодической замены элементов питания беспроводных систем решает установка солнечных батарей. Системы мониторинга, применяющие проводной способ передачи данных, не испытывают сложностей с подзарядкой. Они питаются напрямую от сети сооружения. В бытовых электрических сетях напряжение 220 В, оно не подходит для самой системы. Поэтому внутри монтируются преобразователи, позволяющие из 220 В получить 12 В. В процессе проектирования необходимо

предусматривать будущие затраты на приборы силовой и слаботочной сетей, с помощью которых будет осуществляться передача информации.

2.2 Компоненты системы мониторинга

Среди компонентов системы мониторинга выделяют:

- подсистему, обеспечивающую диагностирование и наблюдение за ключевыми параметрами, отражающими состояние сооружения;
- методику, позволяющую оценить техсостояние конструкций;
- модели, на основании которых строится прогноз техсостояния и оценивается срок активной эксплуатации;
- информсистемы.

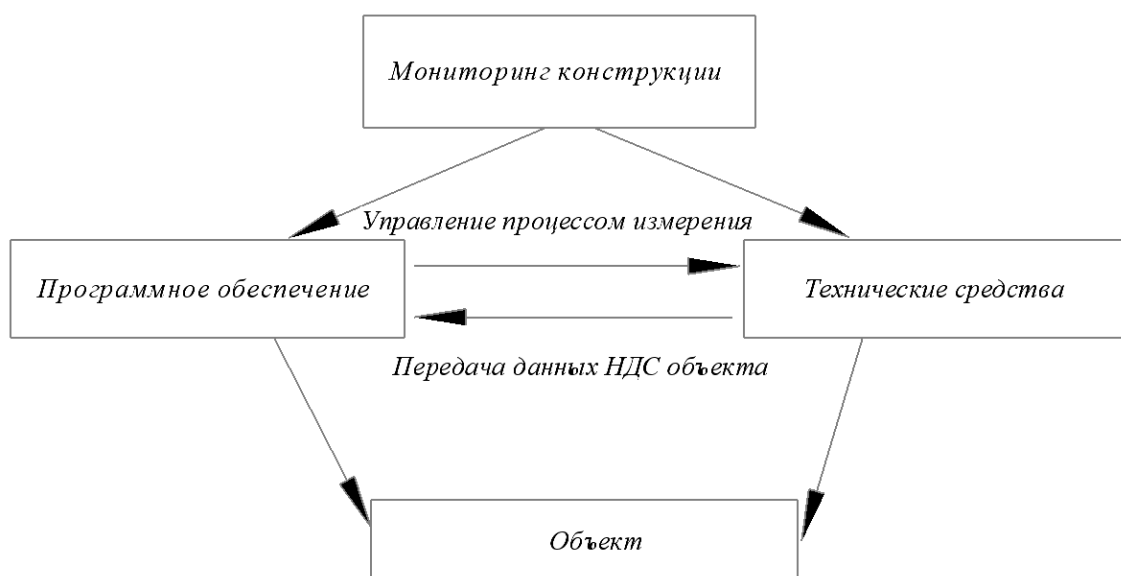


Рисунок 2.1 – Блок-схема взаимодействия компонентов системы мониторинга

Все вместе компоненты системы собирают и систематизируют сведения, включающие фактические геометрические параметры и физические свойства несущих способностей элементов конструкции, а также данных об изменениях в состоянии конструкций.

Диагностику проводят по основным параметрам:

- прочности материалов;
- углу наклона;

- крену фундаментом рам блоков;
- динамическим характеристикам конструкций.

В качестве основы метода оценки используется нормативная база, описывающая критерии (предельные деформация материала, крен) каждого предельного состояния. После проведения оценки по этим критериям выдается заключение, однозначно определяющее возможность эксплуатации сооружения в привычном режиме.

Модели, на основании которых строится прогноз, позволяют определять срок службы сооружения. Результатом прогнозирования являются данные, на основании которых принимается решение о переназначении ресурса и разработке техрешений. Модель прогноза основана на сравнении фактических характеристик и расчетных. Сравняются данные, полученные путем измерения деформации, наклонов, частоты колебания, с данными, рассчитанными с учетом оценки срока эксплуатации и остаточных ресурсов.

Основная задача информационной системы – это хранить и передавать данные. Информсистема предоставляет доступ и отображает сведения обо всех состояниях отдельных конструктивных элементов сооружения в различные периоды: во время строительства, в процессе эксплуатации и во время списания с эксплуатации. Данные предоставляются всем заинтересованным службам.

Еще один компонент (подсистема) системы мониторинга – СУБД (система управления базой данных). СУБД является частью информсистемы и непосредственно хранит, отображает и обеспечивает доступ к информации. СУБД состоит из экранных форм, размещенных на рабочих местах операторов, журналов и паспортов [2].

2.3 Информационно–измерительная система контроля напряженно-деформированных состояний

Информационно–измерительная система (ИИС) – многокомпонентное устройство, структурно состоящее из трех компонентов. ИИС не может работать без автоматизированного рабочего места, программного обеспечения

и специальных приборов. Информационно–измерительная система ответственна за:

- поддержание безопасных условий жизнедеятельности населения. Это возможно благодаря постоянному мониторингу за состоянием сооружений и их отдельных конструктивных элементов;
- своевременное обнаружение опасных дефектов в сооружениях и их отдельных конструктивных элементах. То есть выявление напряженно-деформированных состояний, из-за которых значительно ухудшается состояние конструкции;
- аккумуляция сведений обо всех напряженно–деформированных состояниях конкретных сооружений и их элементов;
- мониторинг в автоматическом режиме реального времени НДС каждой несущей строительной конструкции и элемента с помощью сбора данных от комплекса датчиков с преобразователями [3].

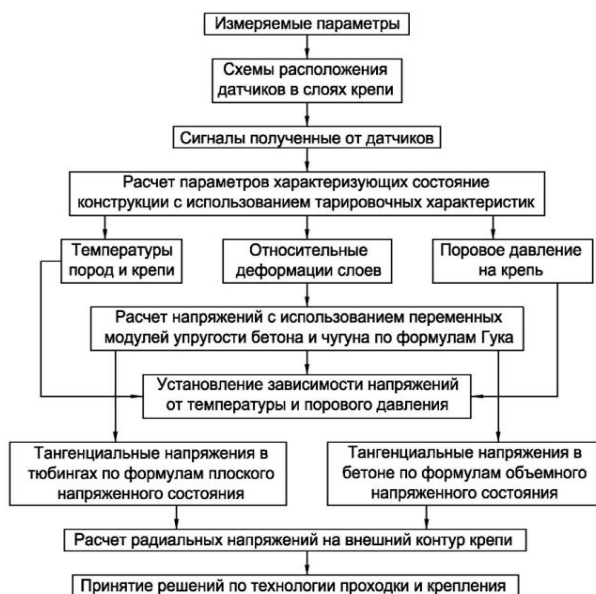


Рисунок 2.2 – Блок–схема обработки экспериментальных данных

ИИС в основном используется для мониторинга 3 параметров:

- деформация бетона;
- деформация арматуры;
- усилия арматуры.

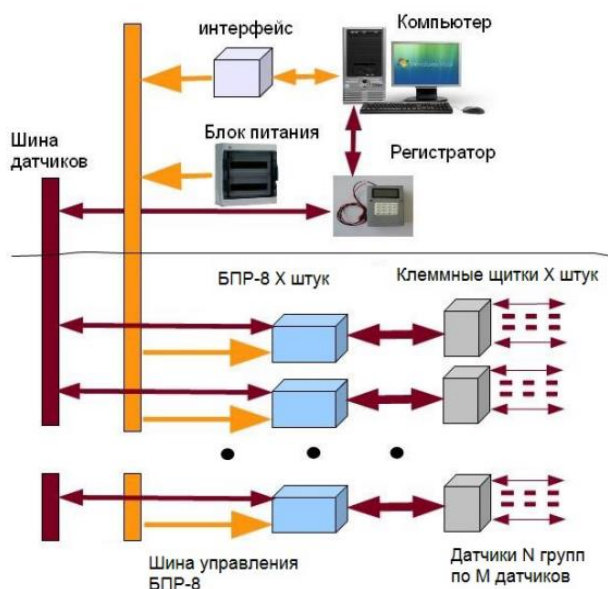


Рисунок 2.3 – Блок–схема по организации ИИС

ИИС сложная система и включает ряд компонентов. Аппаратные средства преобразования и сбора информации состоят из персональной ЭВМ и преобразовательных блоков, реализующих слаботочную электрическую сеть. Информацию на аппаратный узел передают измерительные струнные преобразователи, работающие на электромагнитном импульсном возбуждении.

Блоки преобразователей в свою очередь включают комплекс плат, обеспечивающих работоспособность устройств управления, связи, питания и розетку RS 422, позволяющую подключить весь блок к персональной ЭВМ. Преобразователь, работающий на электромагнитном импульсном возбуждении, посылает сигнал на устройство связи. Сами блоки преобразователей соединяются с персональной ЭВМ благодаря нескольким интерфейсам передачи сведений RS 422.

Действие блоков преобразователей состоит из 3 шагов:

- опрос измерительных струнных преобразователей согласно программе;
- создание импульсов, направленных на возбуждение колебаний струн преобразователей;
- измерение периода вызванных колебаний.

Измерение периода вызванных колебаний струн измерительных преобразователей базируется на счетно-импульсном методе, когда специальное устройство считает входящие импульсы опорной частоты. В качестве временного отрезка для подсчета используется 100 измеряемых периодов. Персональная ЭВМ посылает через RS 422 запросы на устройство управления. Каждая команда обязательно должна содержать одинаковый набор информации о:

- номере блока и канала;
- режиме работы;
- амплитудном значении импульса возбуждения;
- значении задержки начала измерения.

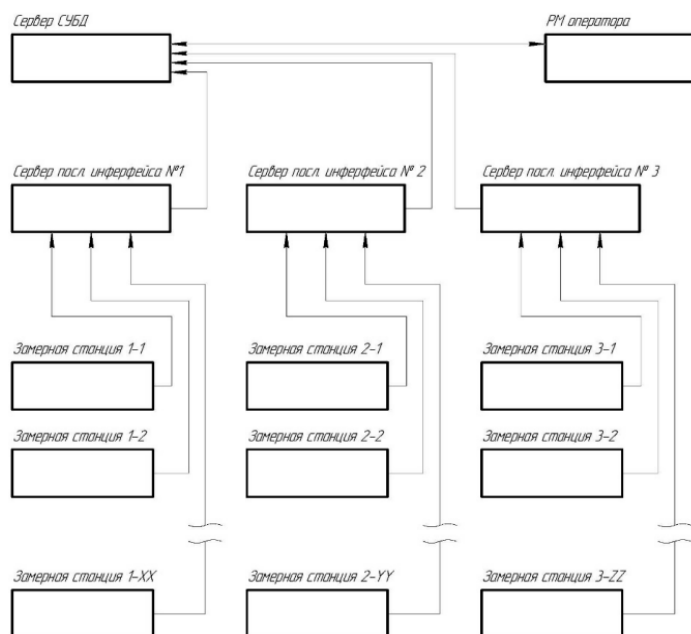


Рисунок 2.4 – Схема управления удаленными коммутаторами сигнала от датчиков

Рабочий режим позволяет устройству управления вырабатывать 2 вида сигналов: адреса и управления. Адресные сигналы идут напрямую в коммутатор. При передаче сигналов адреса входы измерителей струнных преобразователей соединяются со схемой измерения. В свою очередь

управляющие сигналы отвечают за формирование диаграммы (кратковременной, а не постоянной) режима работы.

Локальная вычислительная сеть объединяет сервера, отвечающие за автоматизированное рабочее место и систему управления базой данных. Сервер СУБД регулярно (согласно установленным промежуткам времени) автоматически подсоединяется к автоматизированному рабочему месту. Подключение позволяет СУБД получить свежую информацию об измерениях и внести ее в базу данных. В процессе записи параллельно выполняются необходимые расчеты, позволяющие провести оценку физических параметров. После чего оператору на рабочее место передается с помощью программного обеспечения актуальная информация и производится ее обработка.

Подобная ИИС особенно актуальна для обеспечения безопасности сооружений, расположенных под землей, куда доступ для визуального осмотра и мониторинга ограничен [3].

Рассмотрев существующие системы мониторинга, можно сказать, что методология, применяемая для оценки НДС различных сооружений или агрегатов имеет строгую структуру. Сначала производятся расчеты НДС. Далее на основании анализа этих расчетов находятся уязвимые места, где возникает наибольшая концентрация напряжений под собственным весом или под действием иного вида нагружения.

Именно в этих местах устанавливаются специальные датчики, позволяющие контролировать деформацию. Величины напряжения и перемещения для разных частей конструкции являются проектными при вводе в эксплуатацию.

После ввода в эксплуатацию проводится мониторинг, позволяющий получить актуальные данные о состоянии конструкции. Именно с проектными впоследствии сравниваются значения, снятые в режиме реального времени.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДЪЕМНОГО УСТРОЙСТВА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС ЕГО САМОЙ НАГРУЖЕННОЙ ЧАСТИ

Первым этапом для определения нагруженных участков исследуемого объекта, в которых как правило могут возникать различного рода деформации, представляющие опасность для всей конструкции в целом является необходимость создания 3D модели агрегата.

Второй этап – это непосредственно моделирование процесса нагружения для последующего анализа НДС подъемного устройства.

Для осуществления вышеуказанных целей существуют специальные системы автоматизированного проектирования, одной из наиболее распространенных и доступных к использованию является программа SolidWorks. Данный программный комплекс содержит инструменты для виртуального тестирования модели в реальной среде, одним из таких инструментов выступает SolidWorks Simulation, который и был использован в данной работе.

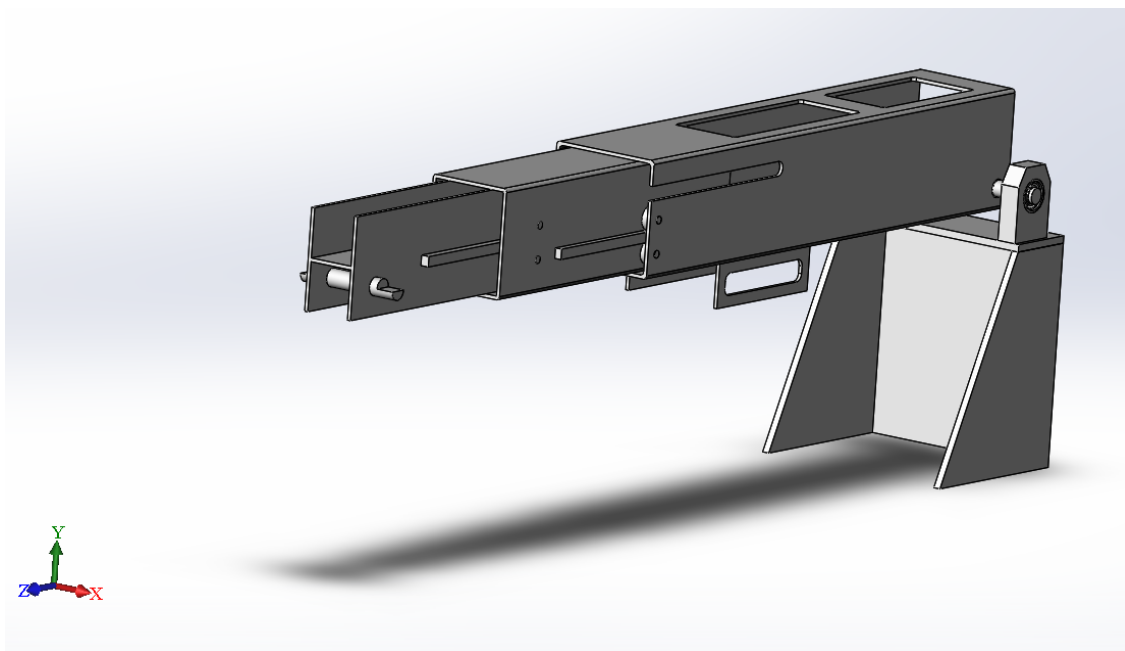


Рисунок 3.1 – Компьютерная 3D модель подъемного устройства СГУ–АТРГ–ГПМ

3.1 Порядок проведения исследования в среде SolidWorks

Для определения НДС агрегата в SolidWorks выбираем статическое исследование.

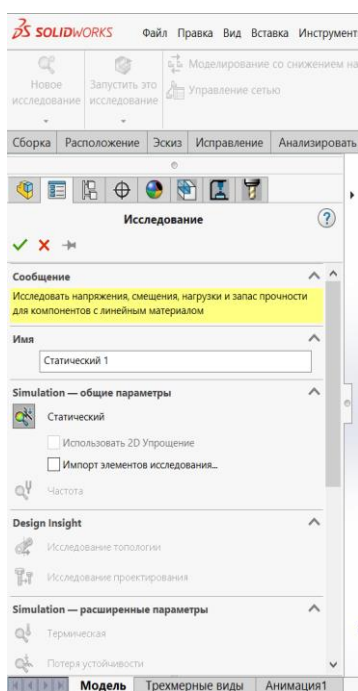


Рисунок 3.2 – Выбор необходимого анализа в SolidWorks Simulation

Далее для всей конструкции требуется задать материал, в нашем случае им является низколегированная конструкционная сталь 10ХСНД, так как в базе SolidWorks materials он отсутствует, то его свойства необходимо задать в ручную (рисунок 3.3).

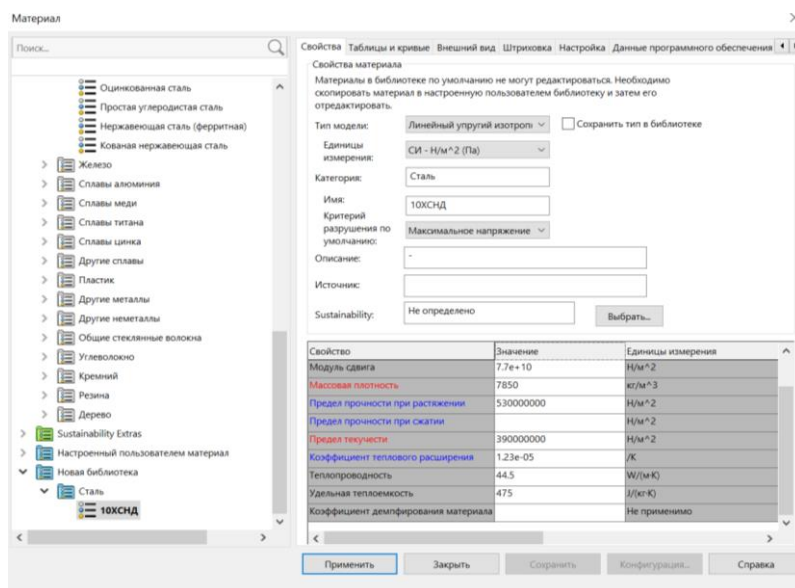


Рисунок 3.3 – Подбор материала и его свойств

Следующий шаг – это фиксация модели в местах ее крепления, на рисунке 3.4 изображено крепление опоры агрегата к силовой раме, рисунок 3.5 иллюстрирует место крепления первого блока с гидроцилиндром.

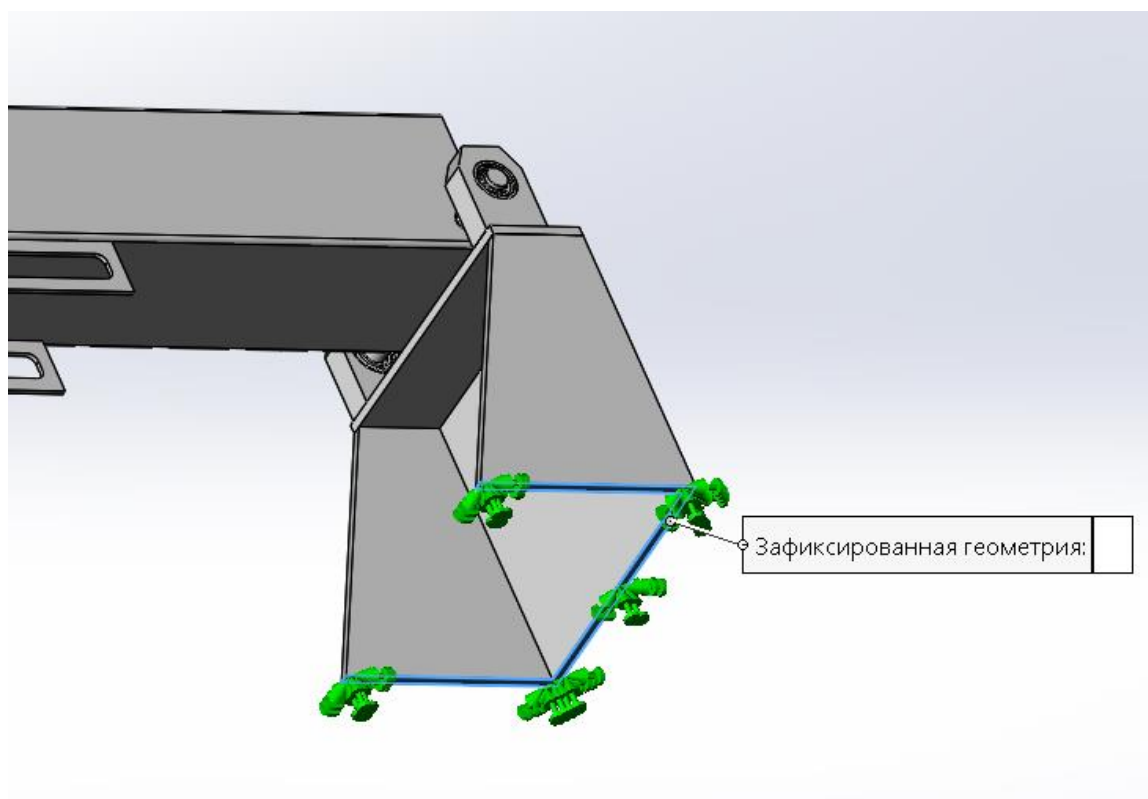


Рисунок 3.4 – Место крепления опоры агрегата к силовой раме

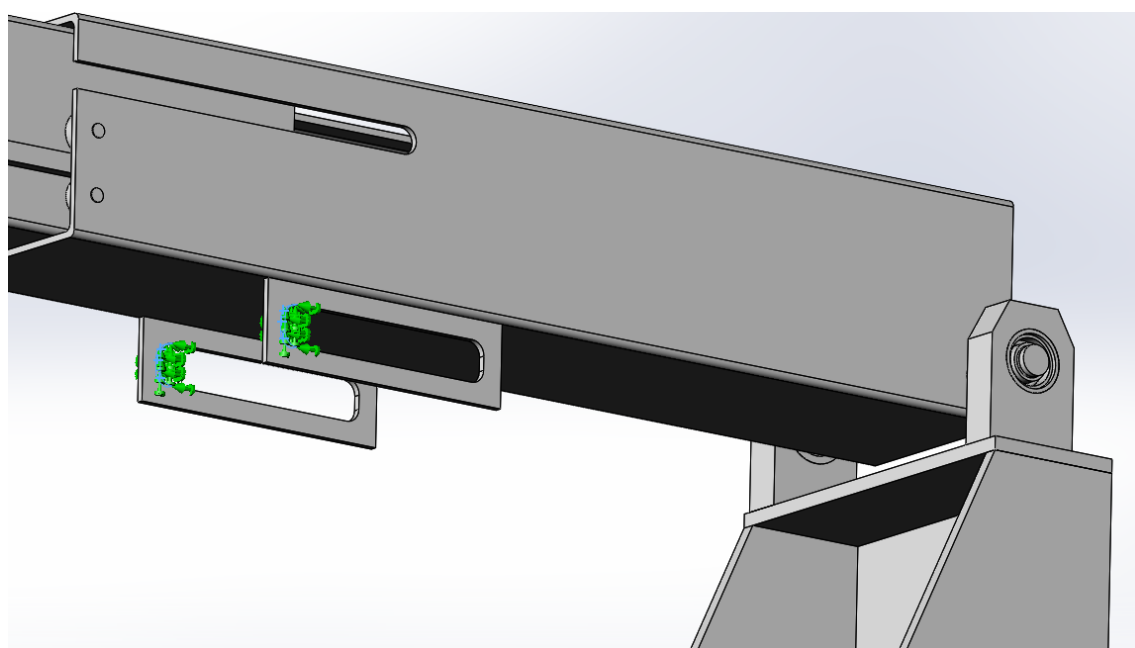


Рисунок 3.5 – Место крепления первого блока и гидроцилиндра

На ось где расположен груз в виде металлических блинов, прикладываем нагрузку в 196 Н или 20 килограмм (рисунок 3.6).

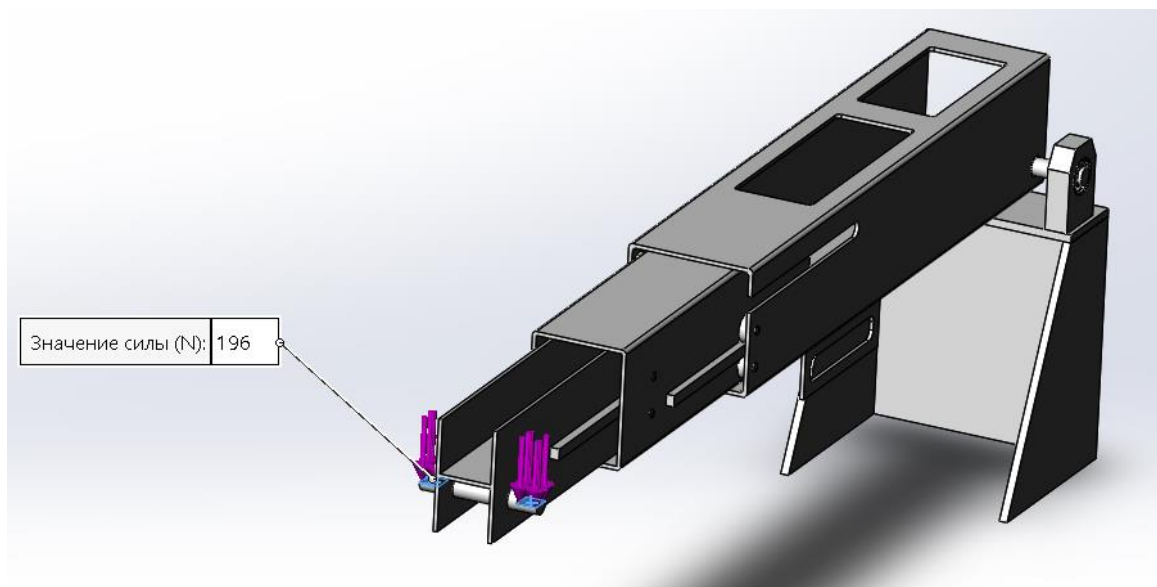


Рисунок 3.6 – Расположение нагрузок на оси с блинами

Последний шаг – создание сетки. Как показано на рисунке 3.7, была выбрана сетка стандартного типа с высокой плотностью, создание сетки с максимальной плотностью занимает немало времени и требует высокой производительности компьютера, но зато позволяет провести более точный и качественный анализ модели.

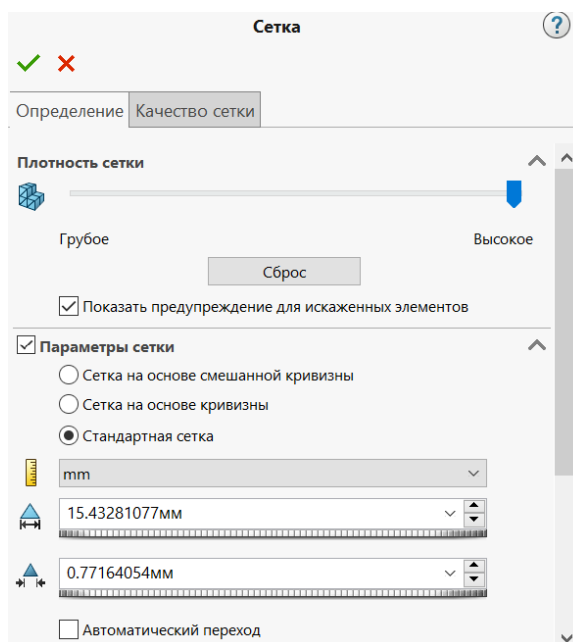


Рисунок 3.7 – Параметры сетки

ПО SolidWorks использует численный метод исследования различных конструкций, то есть метод конечных элементов. Данный метод считается стандартным из-за своей универсальности и возможности применения на компьютерных устройствах. Суть метода конечных элементов заключается в разделении всей модели на большое количество маленьких частей, имеющих простую форму, в свою очередь это позволяет заменить решение сложной задачи более простыми, которые требуется решить совместно.

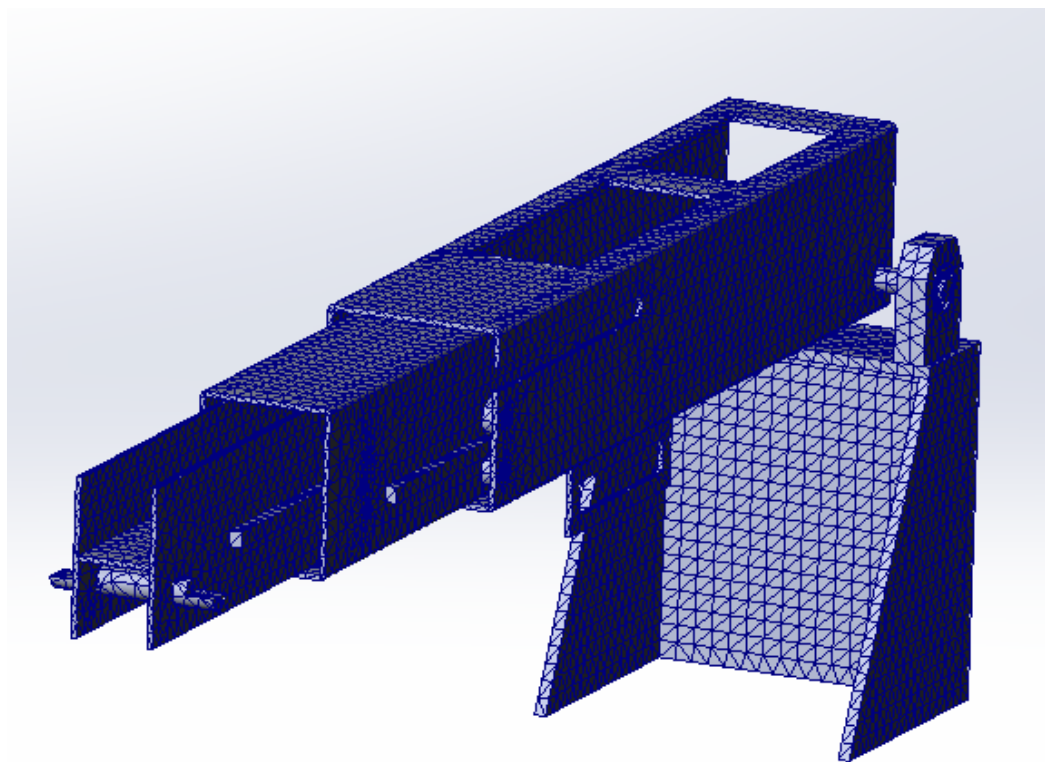


Рисунок 3.8 – Создание сетки подъемного устройства

3.2 Выявление наиболее уязвимой части конструкции и определение угла наклона при котором возникают максимальные по величине напряжения

После проведения операций, указанных в пункте 3.1 можно запускать исследование. Проведенный анализ выявил один из наиболее нагруженных участков конструкции, им является верхняя часть первого блока стрелы. Данная часть конструкции имеет два прямоугольных выреза, что является ослаблением конструкции и как правило концентратором напряжений.

Для оценки характера распространения напряжений и их величин при работе подъемного устройства было проведено 10 анализов под разными углами расположения стрелы, значения углов составляют: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 градусов.

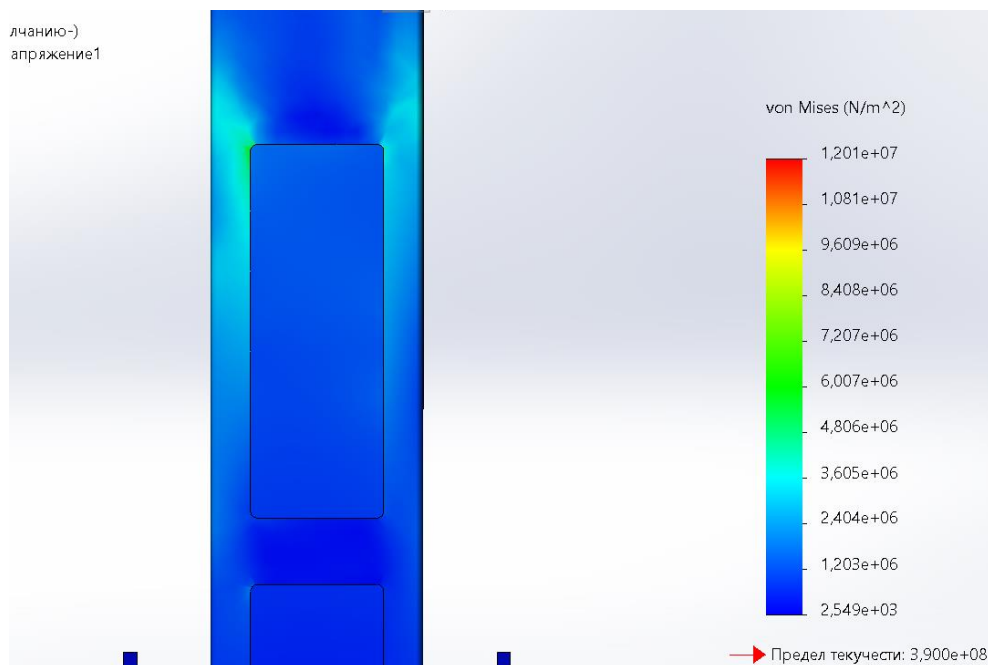


Рисунок 3.9 – Распространение напряжений под углом 0 градусов

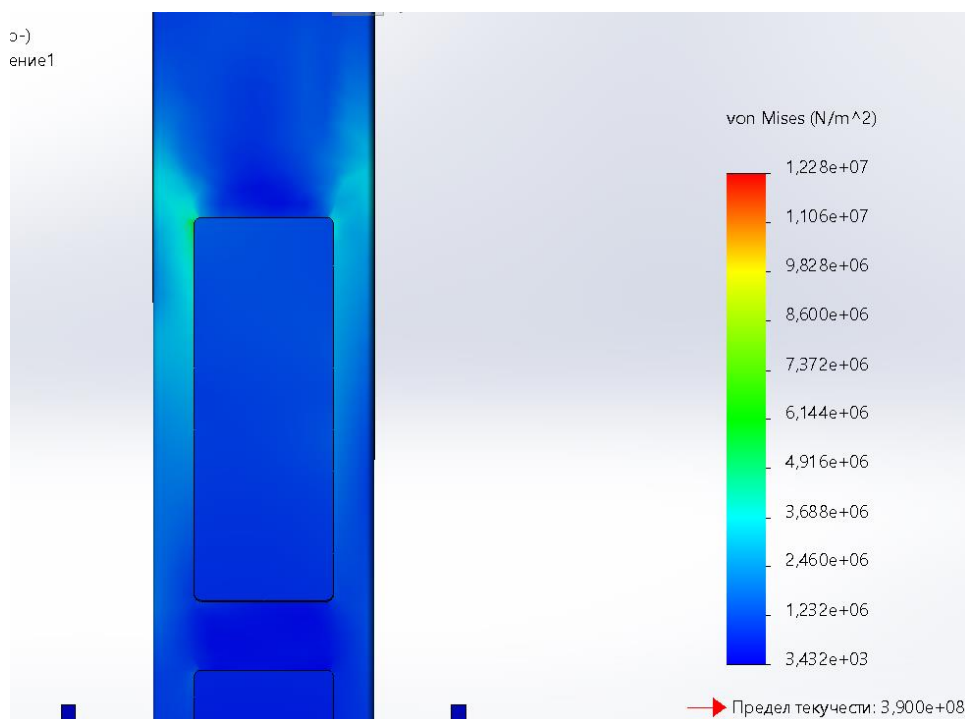


Рисунок 3.10 – Распространение напряжений под углом 10 градусов

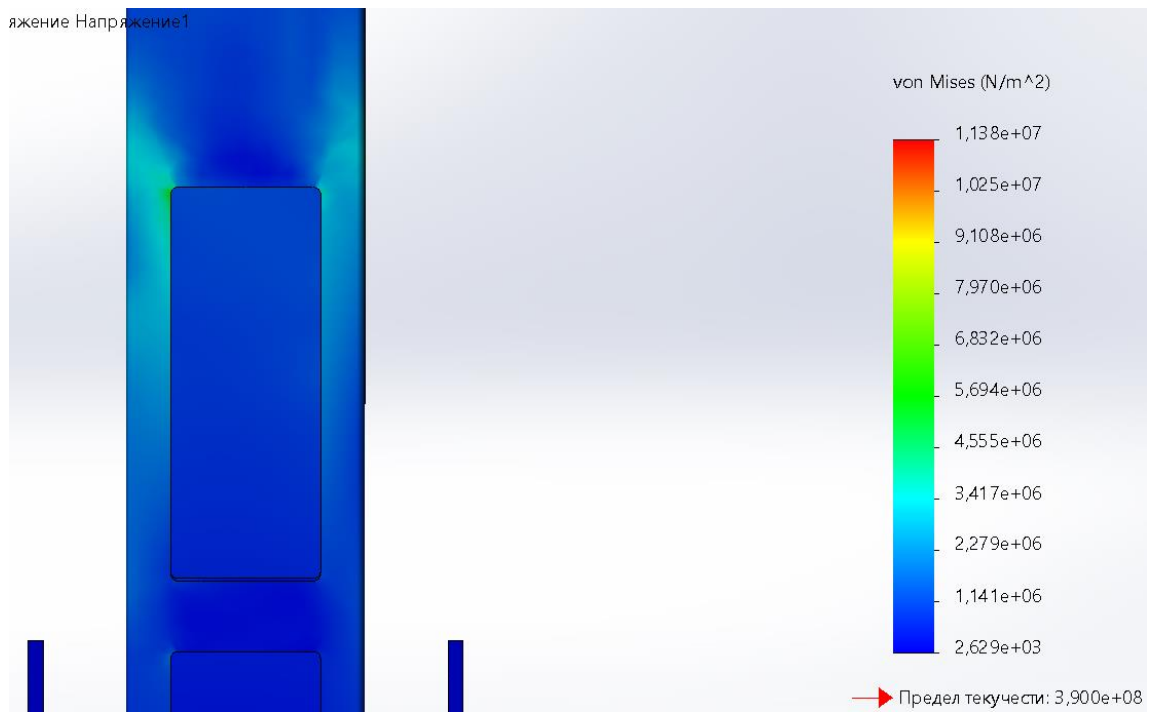


Рисунок 3.11 – Распространение напряжений под углом 20 градусов

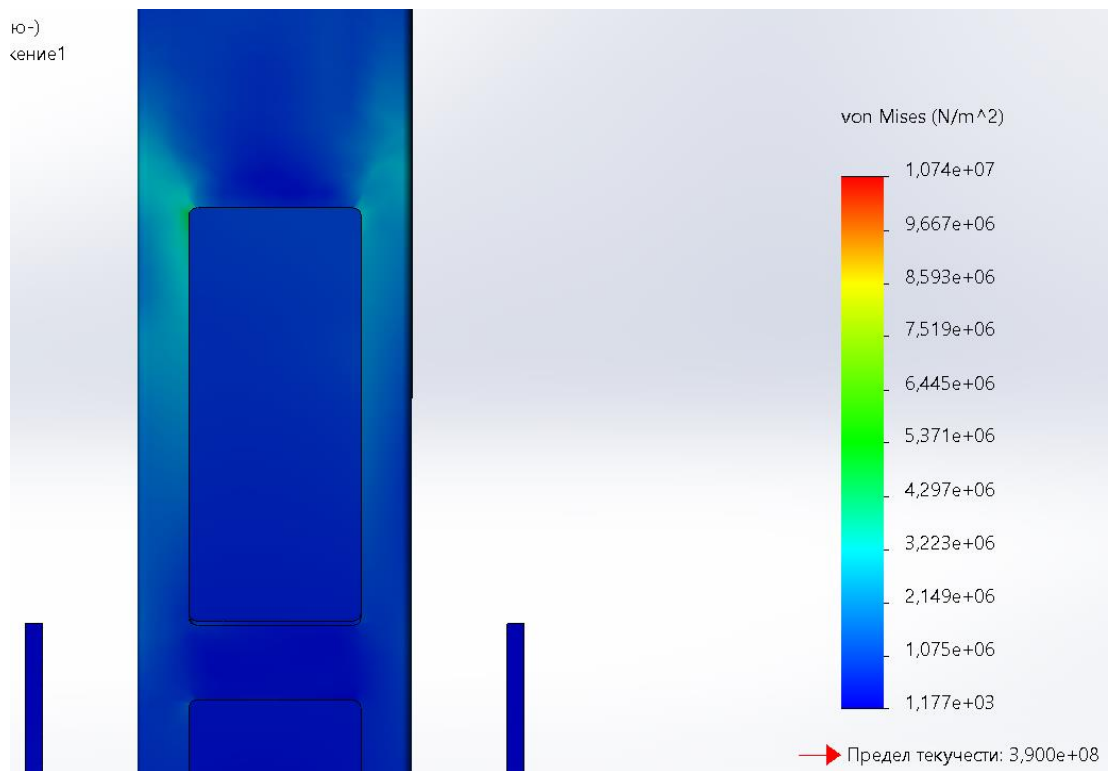


Рисунок 3.12 – Распространение напряжений под углом 30 градусов

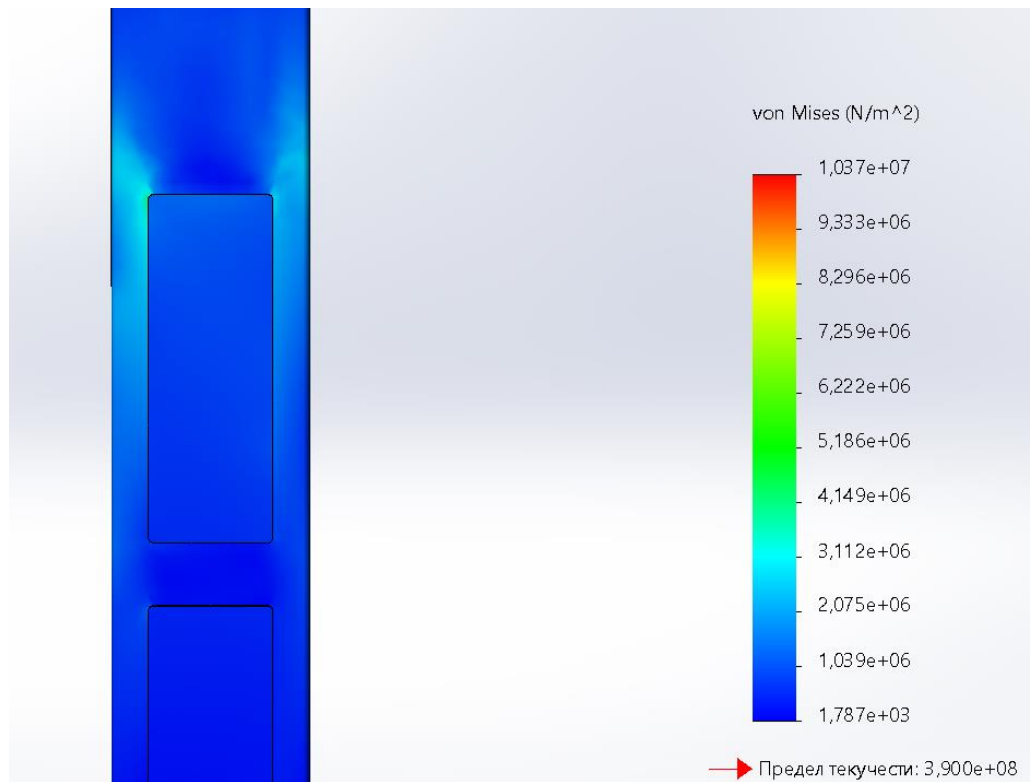


Рисунок 3.13 – Распространение напряжений под углом 40 градусов

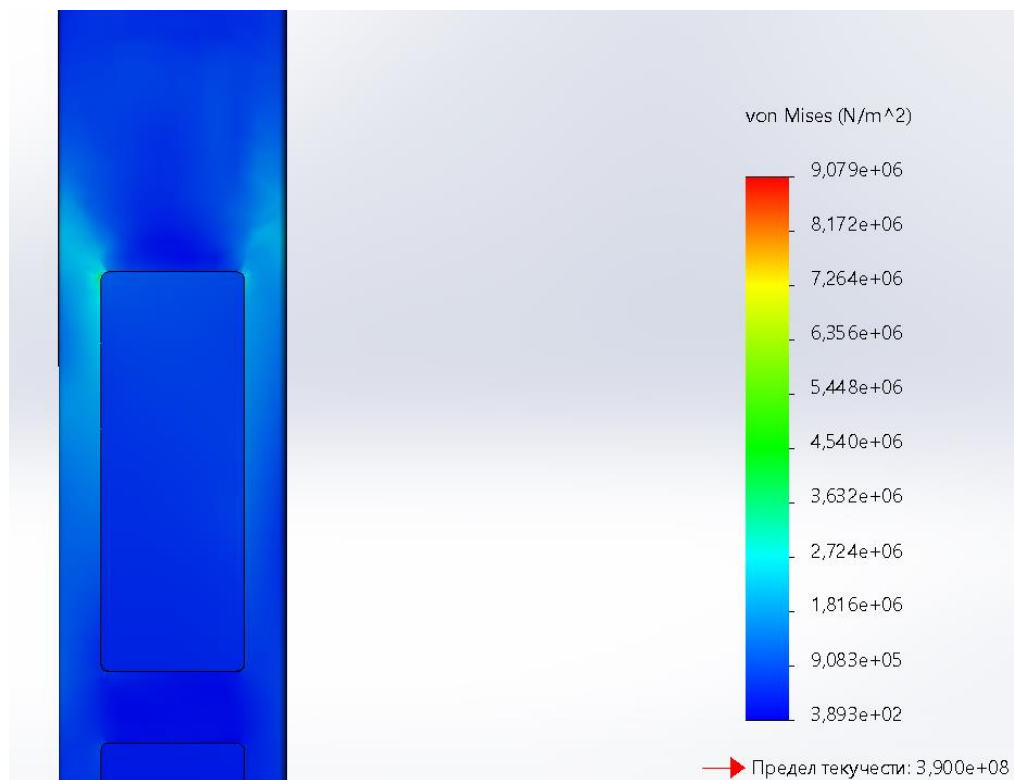


Рисунок 3.14 – Распространение напряжений под углом 50 градусов

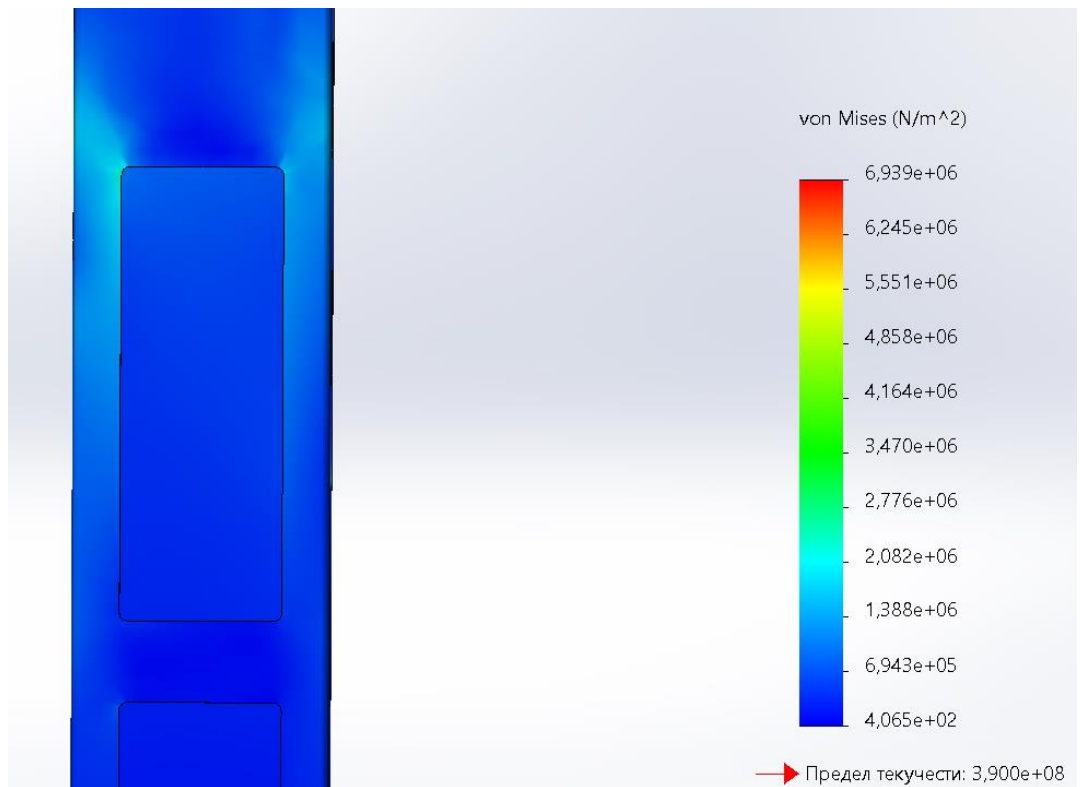


Рисунок 3.15 – Распространение напряжений под углом 60 градусов

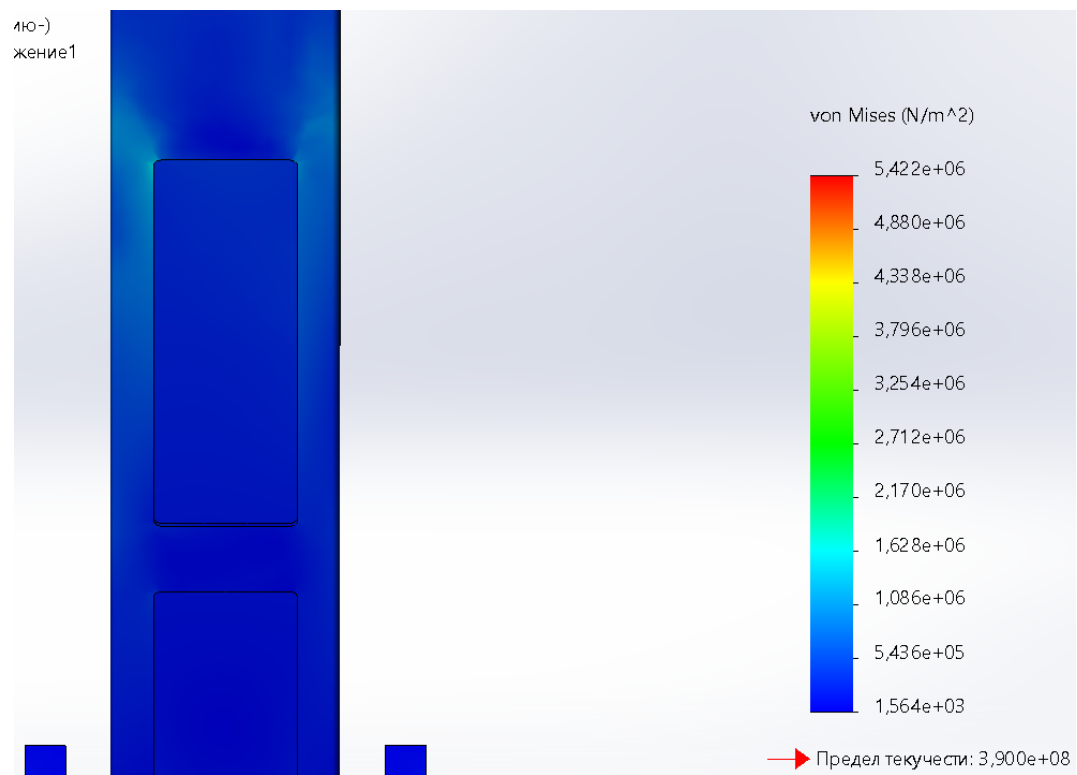


Рисунок 3.16 – Распространение напряжений под углом 70 градусов

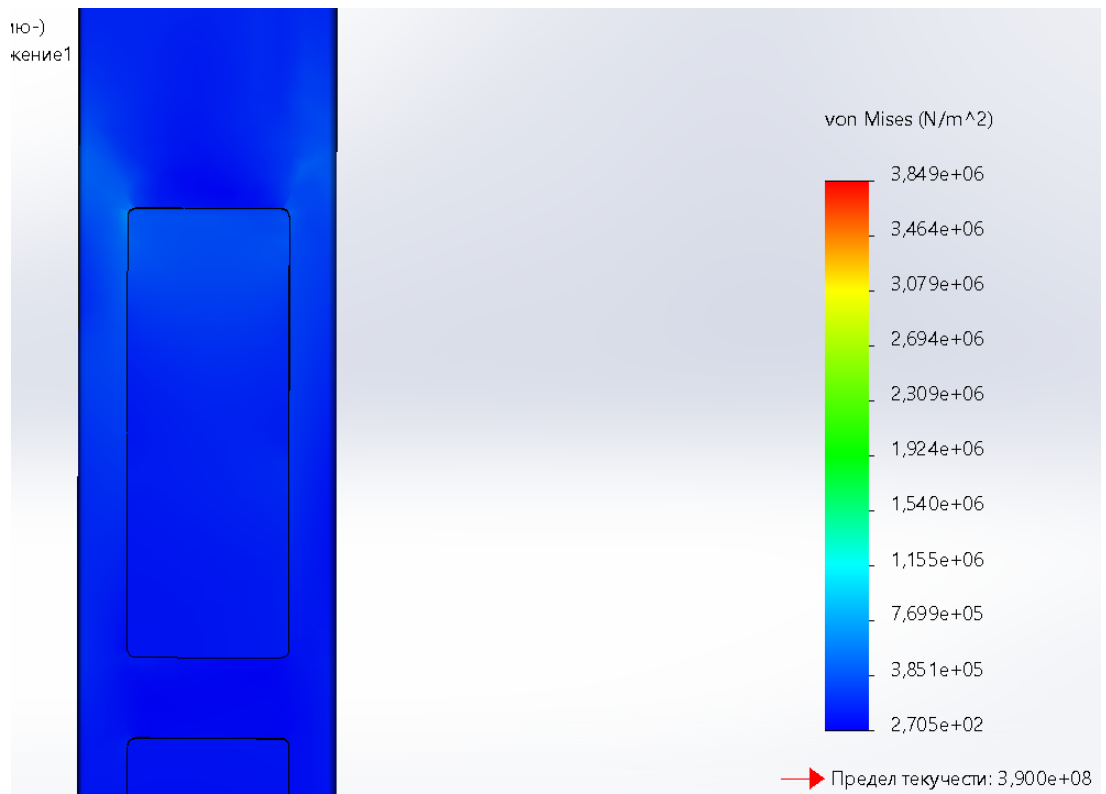


Рисунок 3.17 – Распространение напряжений под углом 80 градусов

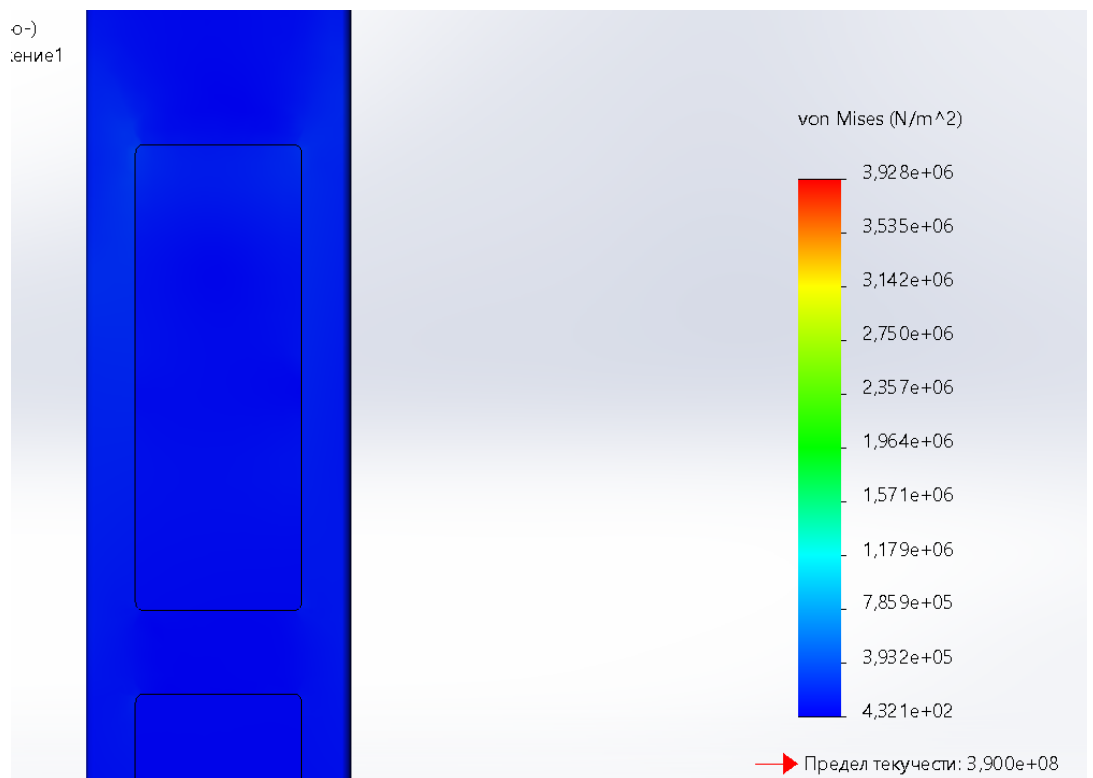


Рисунок 3.18 – Распространение напряжений под углом 90 градусов

Проанализировав рисунки 3.9 – 3.18, на которых изображено распределение напряжений первого блока, можно сказать, что наибольшая концентрация напряжений возникает при расположении стрелы агрегата под углом 0 градусов. В данном положении блок испытывает максимальный изгиб и следовательно имеет максимальные по величине напряжения.

При подъеме стрелы в промежутке от 0 до 20 градусов происходит постепенное распределение нагрузки и как следствие небольшое уменьшение напряжений. При дальнейшем увеличении градуса подъема наблюдается интенсивный спад напряжений, так как нагрузки начинают стремительно перераспределяться по всей конструкции. Более четко данную динамику изменения напряжений можно проследить на рисунке 3.19, где представлен график зависимости напряжений от угла подъема стрелы агрегата.

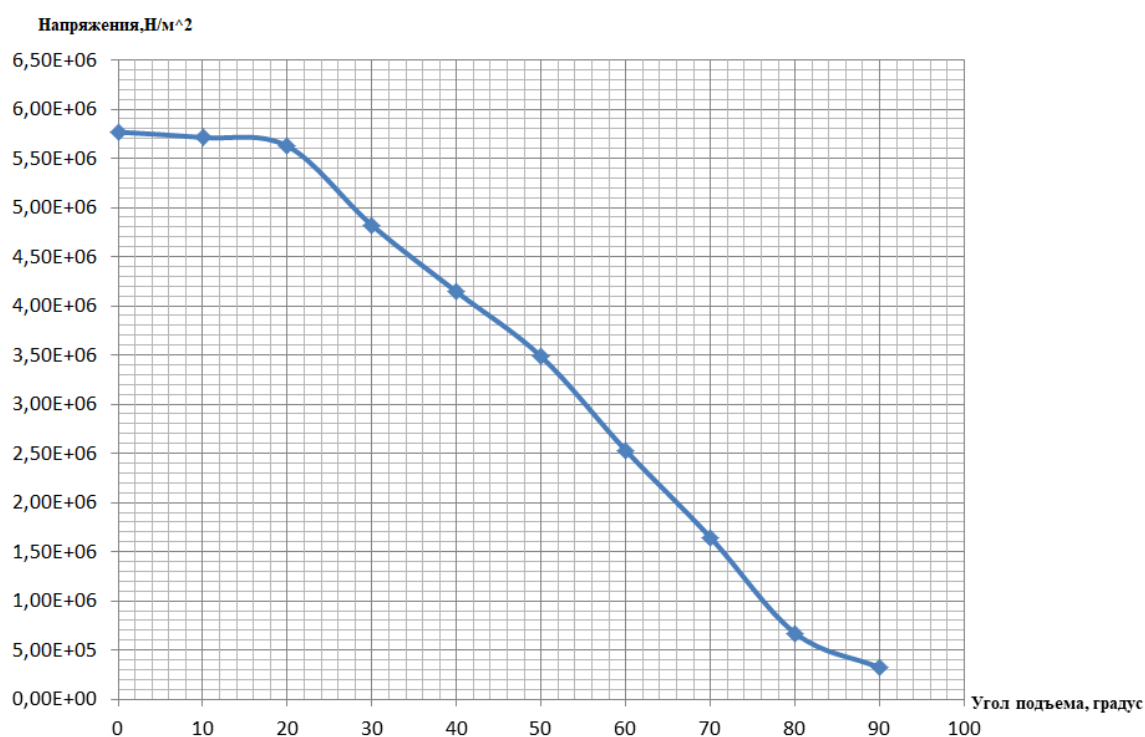


Рисунок 3.19 – График зависимости напряжений от угла подъема стрелы агрегата



Рисунок 3.20 – График зависимости перемещений от угла подъема стрелы агрегата

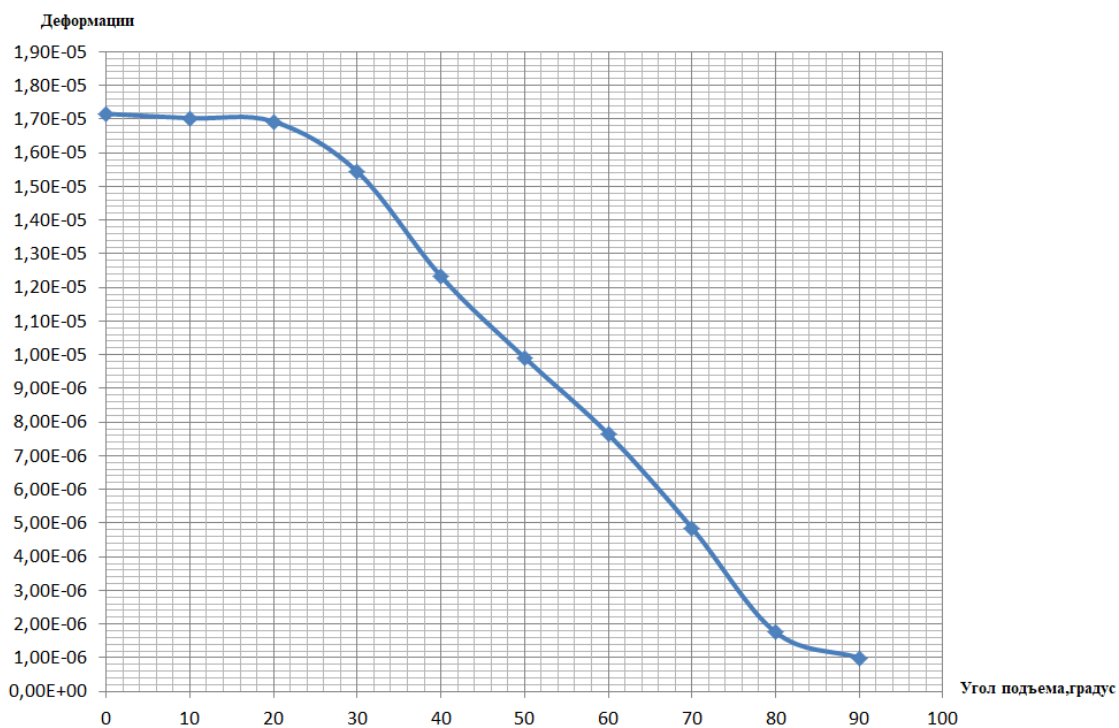


Рисунок 3.21 – График зависимости деформаций от угла подъема стрелы агрегата

3.3 Анализ напряженно–деформированного состояния первого блока под углом 0 градусов

Как говорилось ранее в пункте 3.2, наиболее опасным положением стрелы является ее расположением под углом 0 градусов. Исходя из этих данных, было проведено 8 исследований для выявления зависимости напряжений от нагрузки, прикладываемой к оси агрегата.

Результаты исследований приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Определение напряжений в зависимости от прикладываемой нагрузки на ось стрелы

Масса груза, кг	0	172	279	387	494	602	709	817	924
Напряжение σ , МПа	0	24,6	42,1	54,2	71	86,4	101,9	117,3	136,7

На основании таблицы 3.1 был построен график зависимости:

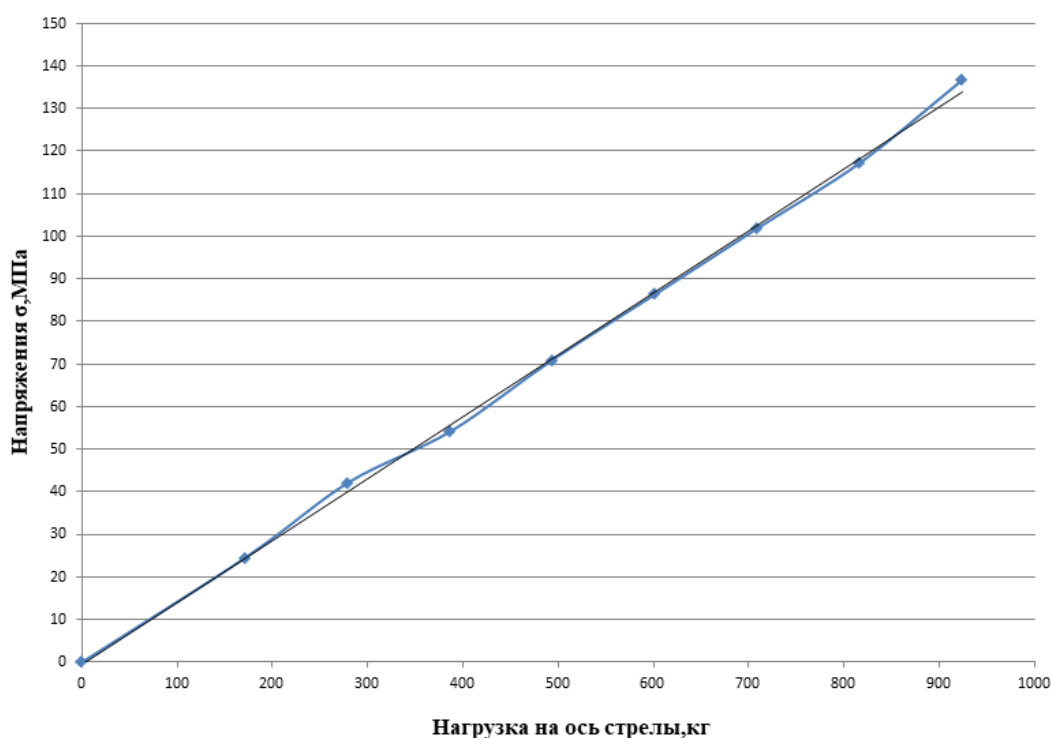


Рисунок 3.22 – График зависимости напряжений на первом блоке от нагрузки на ось стрелы

Значения величин нагрузки на ось стрелы эквивалентны нагрузкам, приложенным к опытному образцу в разделе 4 и 5.

Данный анализ необходим для определения возникновения максимальных значений напряжений в наиболее опасных сечениях конструкции.

4 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НДС НАГРУЖЕННОЙ ЧАСТИ КОНСТРУКЦИИ ОПЫТНЫМ ПУТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕНЗОДАТЧИКОВ

Тензорезисторы нередко применяются при исследованиях НДС конструкций опытным путем. В настоящей работе расчет НДС с использованием тензодатчиков является дополнительной характеристикой, которая нужна для определения реальных деформаций и внутренних напряжений, возникающих в ОК при его нагружении. Так как УЗД позволят вычислить данные величины только теоретически, напряжения, полученные с использованием тензометрии будут необходимы для их применения в разделе 5.

По своей конструкции тензодатчик представляет собой элемент из тензочувствительного материала, который может быть изготовлен из фольги или проволоки (рисунок 4.1).

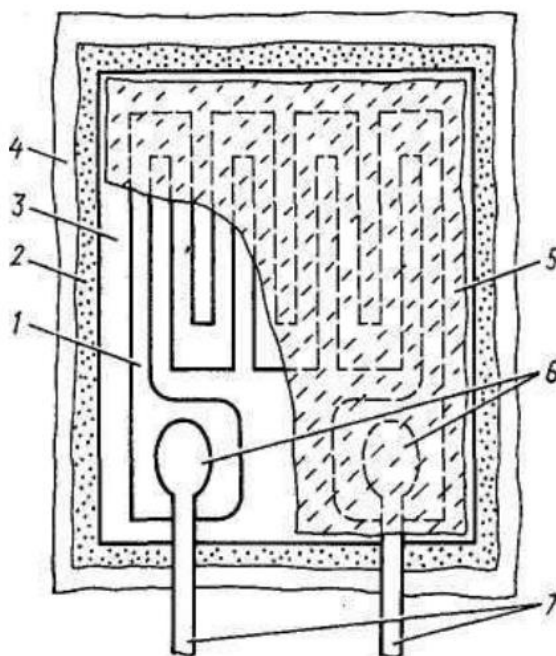


Рисунок 4.1 – Схема тензорезистора: 1 – чувствительный элемент, 2 – связующее, 3 – подложка, 4 – исследуемая деталь, 5 – защитный элемент, 6 – узел пайки, 7 – выводные проводники

Тензодатчики при помощи клея фиксируются на исследуемую деталь и в процессе нагружения деформируются вместе с ней, изменяя свое активное сопротивление, которое в свою очередь регистрируется соответствующей многокомпонентной системой, описанной в пункте 4.1.

4.1 Подбор необходимых компонентов и моделирование схемы подключения

Для проведения контроля с использованием тензорезисторов потребуется наличие следующих компонентов:

- 1) Тензорезистор фольговый BF1000–3AA в количестве 3 штук;
- 2) Плата-микроконтроллер Arduino UNO R3 в количестве 1 штуки;
- 3) Макетная плата в количестве 1 штуки;
- 4) Модуль АЦП ADS 1115 в количестве 2 штук;
- 5) Резистор С1.4–0.25–1 кОм \pm 5% в количестве 9 штук;
- 6) Кабель штекер-штекер в количестве 40 штук.

Представленный перечень компонентов неслучаен, как говорилось ранее, тензодатчик улавливает деформации при собственном изгибе и преобразовывает их в значения сопротивления. Но для того чтобы изменяющееся сопротивление четко отображало исследуемый процесс, его необходимо преобразовывать в пропорциональные изменения напряжения или силы тока. Зачастую сигналы, полученные от тензодатчиков очень слабы и неспособны привести в действие измерительные приборы, в таких случаях используют так называемые усилительные устройства или иначе говоря мостовые схемы подключения.

Тензометрия включает множество вариаций мостовых схем подключения, одной из самых распространенных является схема, состоящая из четырехплечего измерительного моста (мост Уитстона). На его основе была спроектирована модель схемы подключения из трех тензодатчиков в программе Fritzing (рисунок 4.2). Обоснование использования трех тензодатчиков представлено в пункте 4.3.

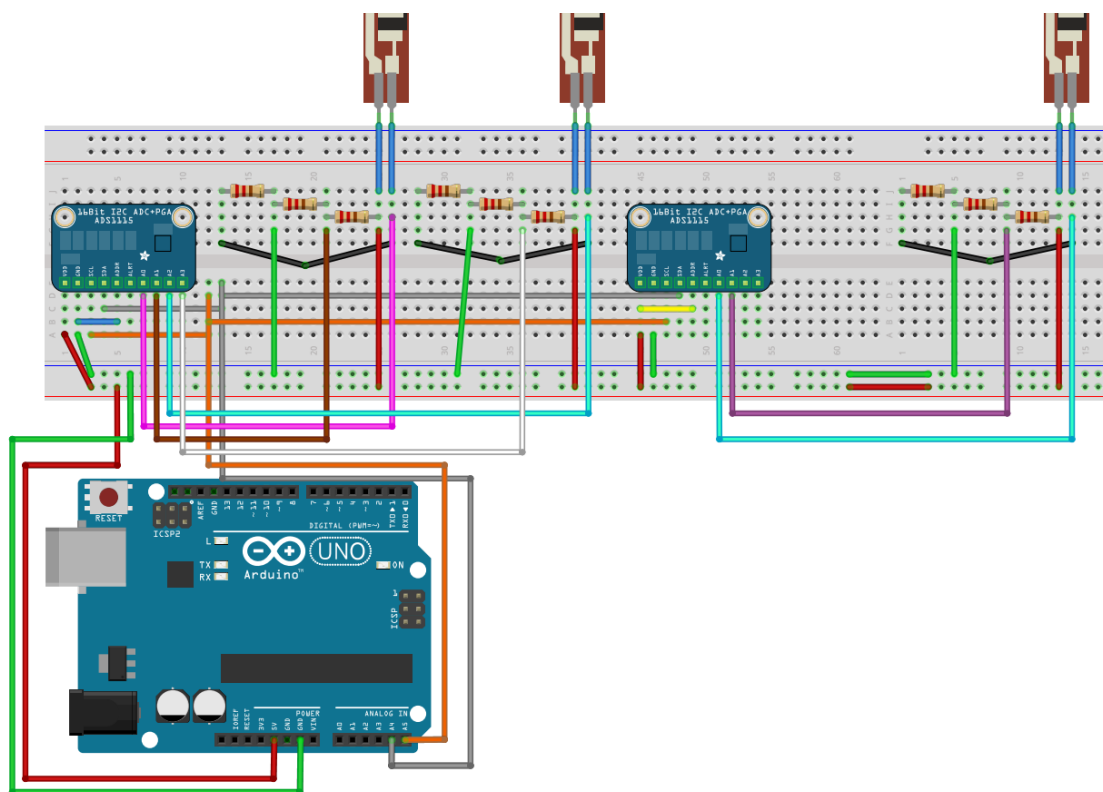


Рисунок 4.2 – Модель схемы подключения датчиков изгиба в программе Fritzing

Для получения данных с тензорезисторов используется программа Arduino IDE. В ней была прописана программа (скетч), которая представлена в приложении А.

4.2 Проектирование схемы нагружения образца для тарировки датчиков изгиба

Одним из основных этапов для проведения исследований НДС опытным путем является тарировка тензодатчиков. Тарировка – это процесс при котором необходимо определить какое число напряжений, полученных с тензодатчиков соответствует величине нагрузки, приложенной к опытному образцу.

Для построения схемы нагружения образца и последующей тарировки датчиков изгиба в настоящей работе используется гидравлический пресс, представленный на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Пресс гидравлический 12т

На основе данного стенда в программной среде Компас–3D была спроектирована схема нагружения пластины – чистый изгиб (рисунок 4.4).

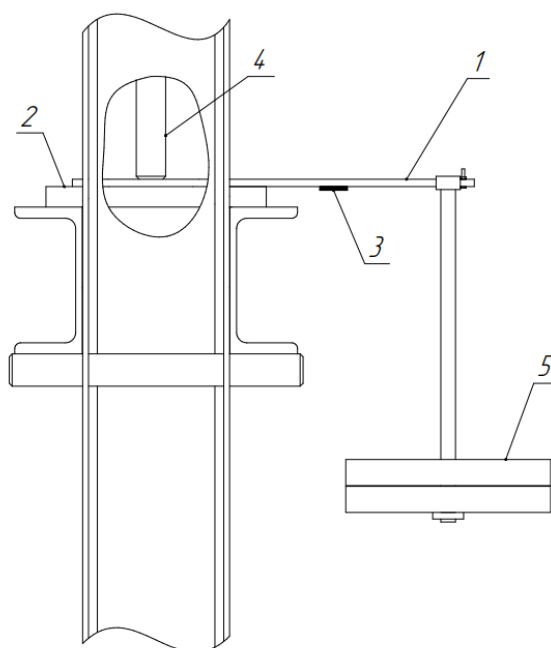


Рисунок 4.4 – Схема нагружения пластины

Из рисунка 4.4 видно, что опытный образец 1 располагается на металлической подложке 2 и с одного конца жестко фиксируется штоком прессы 4.

В свою очередь, на другой конец пластины устанавливается груз в виде металлических блинов 5. Пластина 1 под усилием груза деформируется (изгибается), изгибая при этом тензодатчики 3, которые крепятся на нижней части образца.

4.3 Выбор оптимального расположения датчиков на поверхности образца

Для измерения напряжений, датчики изгиба наклеивают на поверхность ОК учитывая вид его деформации, при растяжении, сжатии, кручении и изгибе датчики устанавливаются по разным схемам.

В нашем случае пластина подвергается чистому изгибу, при котором в образце возникают продольные и поперечные деформации. Для их определения достаточно наличия двух тензодатчиков, расположение которых представлено на рисунке 4.5.

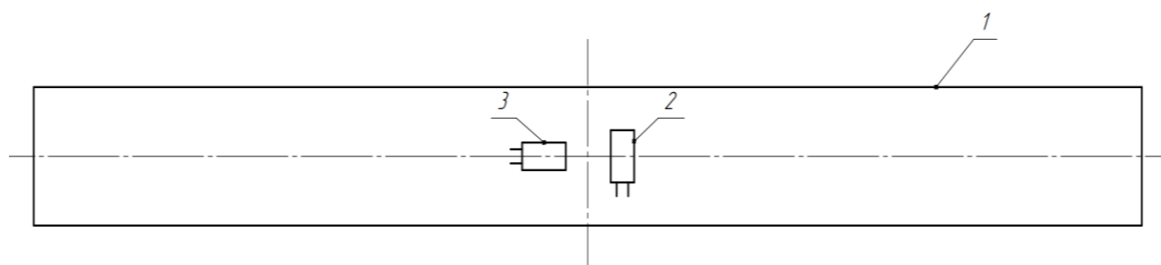


Рисунок 4.5 – Схема установки датчиков при изгибе

На данном рисунке датчики 2 и 3 располагаются точно по центру относительно горизонтальной оси и на небольшом расстоянии относительно вертикальной. При таком расположении датчиков очень важным моментом является определение оптимального расстояния между ними, то есть если датчики будут находиться на недопустимо близком расстоянии друг к другу, то возможно возникновение интерференции (датчик продольной деформации

будет улавливать поперечные деформации, а датчик поперечной деформации продольные), что является грубой ошибкой.

Для расчета оптимального расстояния между датчиками требуется определить направление главных деформаций. Как оказалось это достаточно трудоемкий процесс, так как мы имеем дело с плоским напряженным состоянием пластины, то не всегда удастся понять, каким образом деформации направлены по ее поверхности.

Отсюда следует, что если направление главных деформаций неизвестно, то одним из вариантов является использование так называемых «розеток» датчиков.

Существует два типа расположения датчиков по схеме «розетка»:

- прямоугольная «розетка»;
- равноугольная «розетка» (дельта-розетка).

Для нашего случая целесообразным будет применение равноугольной «розетки» (рисунок 4.6). Дельта-розетка применима в том случае, когда направление главных напряжений неизвестно даже приблизительно.

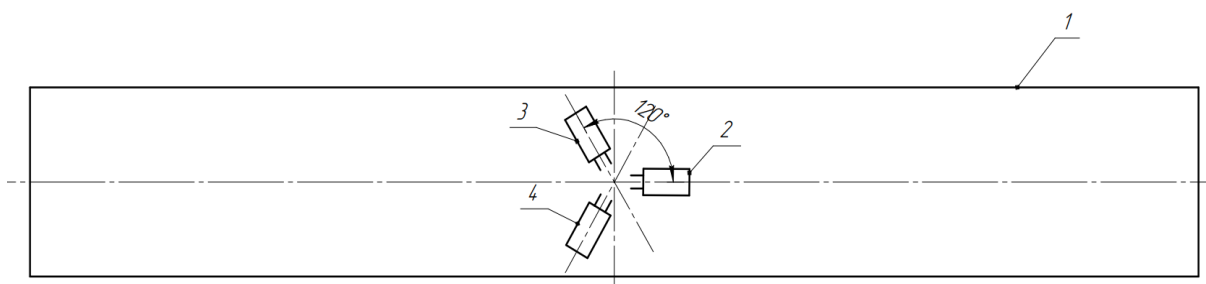


Рисунок 4.6 – Расположение датчиков по схеме дельта-розетка

4.4 Экспериментальное исследование образца

Для проведения исследования НДС конструкции с применением тензорезисторов используется стальная пластина 10ХСНД с размерами 420×40×5 мм.

Общий вид системы представлен на рисунке 4.7.

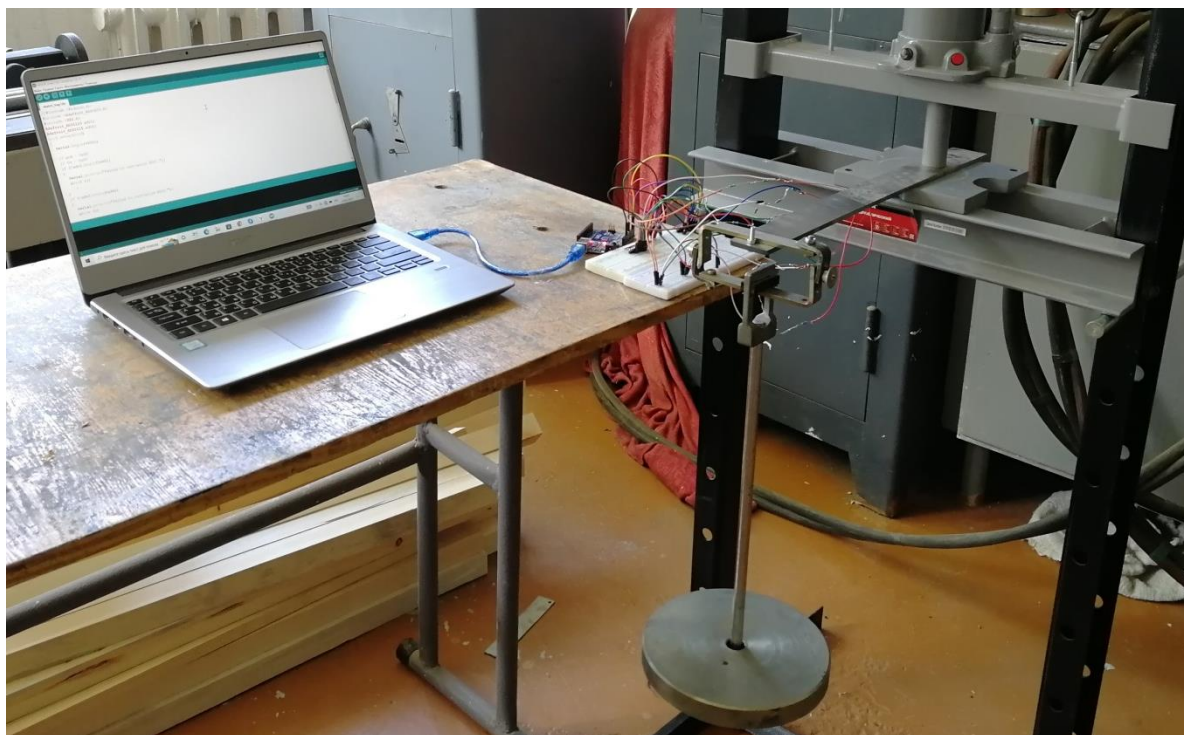


Рисунок 4.7 – Общий вид системы контроля НДС с использованием тензодатчиков

Как говорилось ранее, для проведения эксперимента на поверхность образца должно быть наклеено три тензодатчика по схеме дельта–розетка (рисунок 4.8).

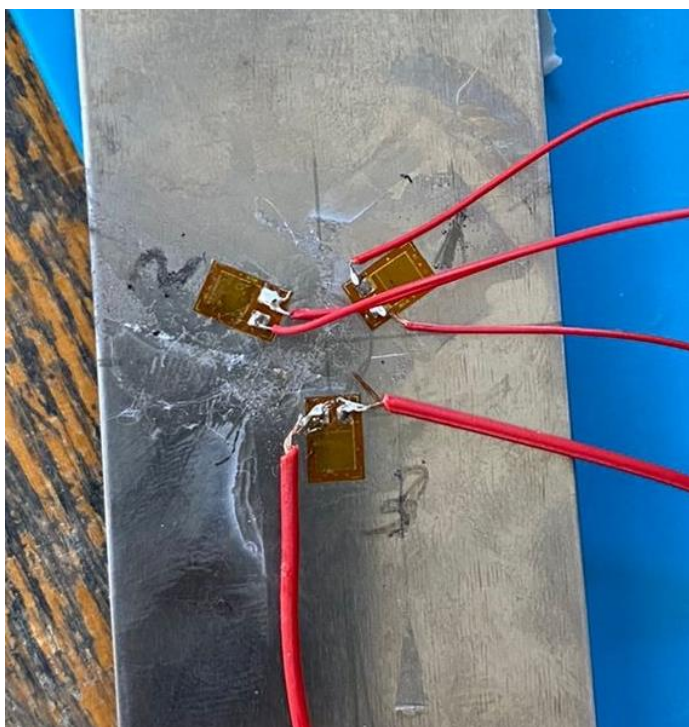


Рисунок 4.8 – Размещение тензорезисторов на опытном образце

Размещение датчиков по такому принципу дало возможность понять направление главных напряжений, которое возникает как оказалось вдоль образца. Данные напряжения были выявлены тензодатчиком под номером 3 (рисунок 4.8). В ходе эксперимента при постепенном нагружении образца максимальные по величине сигналы были получены именно с этого датчика. Поэтому дальнейшее построение тарировочного графика и расчет напряжений будут выполнены исходя из значений, полученных с третьего тензорезистора, результаты измерений приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты показаний тензорезистора

Масса груза, кг	0	8	13	18	23	28	33	38	43
Напряжение U, мВ	0	1,2	1,75	2,5	3,1	4	4,75	5,38	5,75

На основании таблицы 4.1 был построен тарировочный график зависимости напряжения от нагрузки, прикладываемой к образцу (рисунок 4.9).

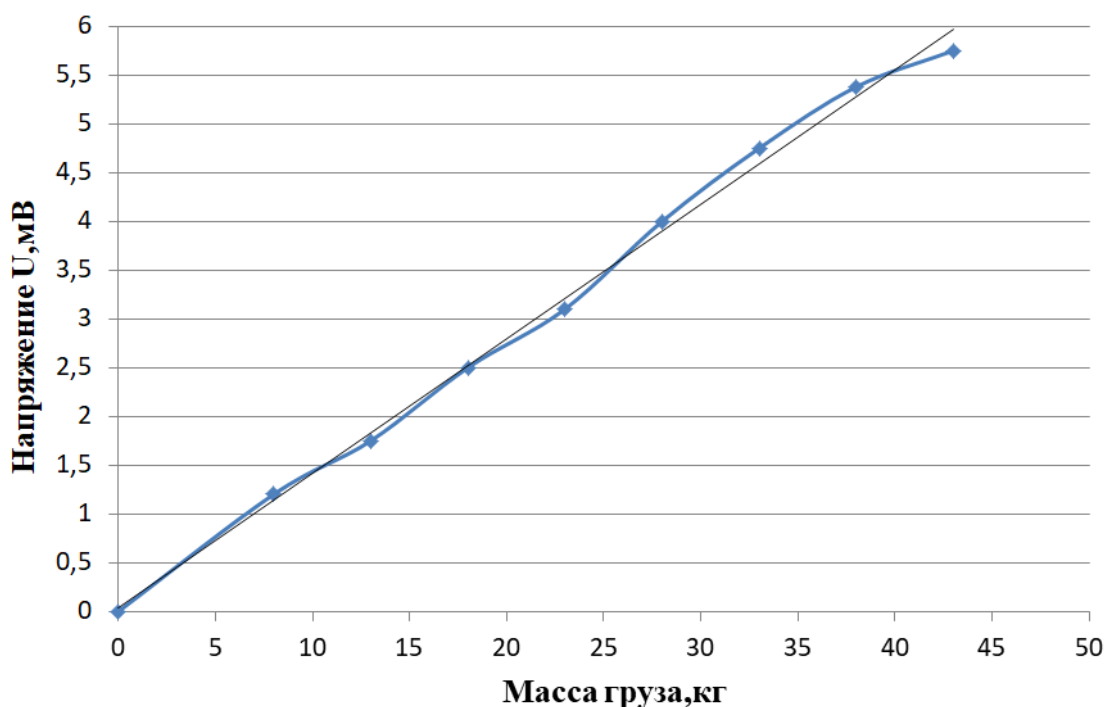


Рисунок 4.9 – Тарировочный график

Идеальным вариантом тарировочного графика является его линейная зависимость, можно заметить, что некоторые точки имеют небольшие отклонения, поэтому учитывая не идеальность проведенного эксперимента данный график все же можно считать линейным.

После построения тарировочного графика можно приступить к расчетам напряжений в точке размещения датчика.

В данной работе используется балка равного поперечного сечения, поэтому несложным будет подсчитать напряжения в центре чувствительного элемента тензорезистора исходя из схемы представленной на рисунке 4.10.

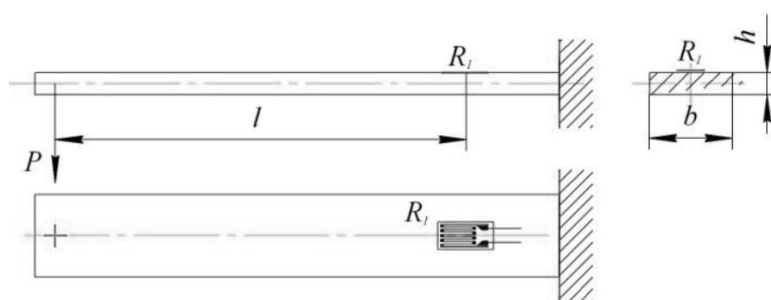


Рисунок 4.10 – Схема расчета напряжений

Для расчета напряжений воспользуемся следующими формулами:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \tag{4.1}$$

где ε – деформации в точке расположения ПЭП;

E – модуль упругости образца, МПа.

Расчет деформаций проводится по формуле:

$$\varepsilon = K \cdot \frac{6 \cdot P \cdot l}{E \cdot b \cdot h^2} \cdot \Delta n, \tag{4.2}$$

где K – коэффициент чувствительности датчика;

P – нагрузка на образец, Н;

l – расстояние от точки приложения нагрузки до центра тензодатчика, м;

E – модуль упругости образца, МПа;

b – ширина образца, м;

h – толщина образца, м;

Δn – разность показаний, полученных с датчиков.

Преобразовав выражения (4.1) и (4.2) получим:

$$\sigma = K \cdot \frac{6 \cdot P \cdot l}{b \cdot h^2} \cdot \Delta n. \quad (4.3)$$

Результаты расчета напряжений в точке размещения датчика изгиба приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчета напряжений в точке крепления датчиков

Масса груза, кг	0	8	13	18	23	28	33	38	43
Напряжение σ , МПа	0	23,6	39,2	53,8	71	82,6	95,2	110,2	126,8

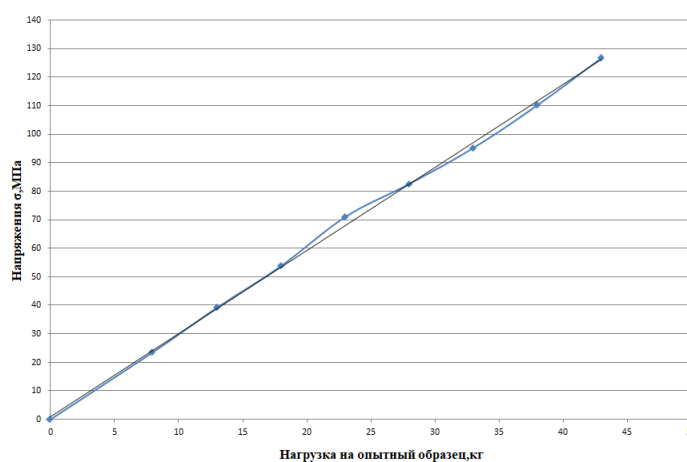


Рисунок 4.11 – Характер возникновения напряжений на образце от нагрузки

В результате расчетов была определена зависимость величин напряжений, возникающих на объекте контроля от прикладываемой к нему нагрузки в соответствии с таблицей 4.2.

5 ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТОУПРУГОСТИ И ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ТРЕХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

5.1 Система мониторинга с использованием акустоупругости

Среди различных существующих методов НК, которые нацелены на измерение напряжений в конструкции, акустоупругость имеет свои особенности.

Данный метод основывается на таком явлении, как упругоакустический эффект, то есть определение зависимости между скоростью распространения высокочастотных звуковых колебаний в поверхностном слое ОК (время их задержки) от напряжений, возникающих при деформации объекта контроля. Что позволяет выявить предельное напряженное или близкое к нему состояние конструкции для своевременного предотвращения поломки.

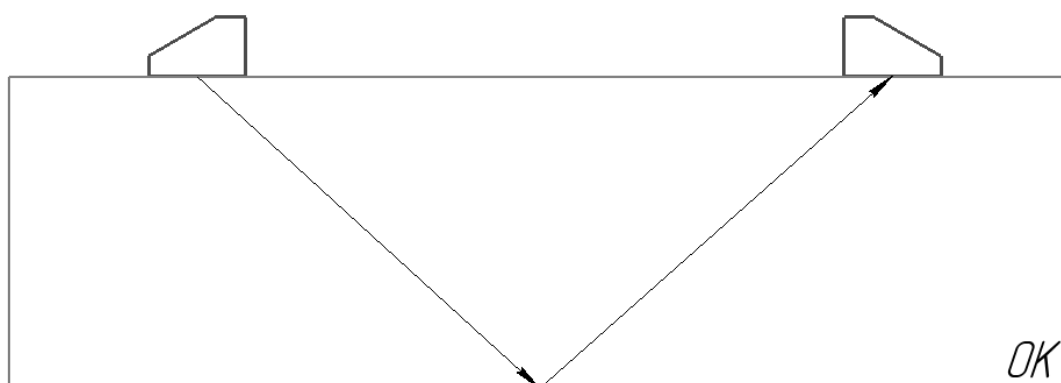


Рисунок 5.1 – Схема измерения скорости ультразвука

Для проведения контроля на исследуемом объекте необходимо расположить два пьезопреобразователя наклонного типа, один из которых излучает акустический пучок в материал, а другой принимает его.

Общий вид системы контроля представлен на рисунке 5.2.

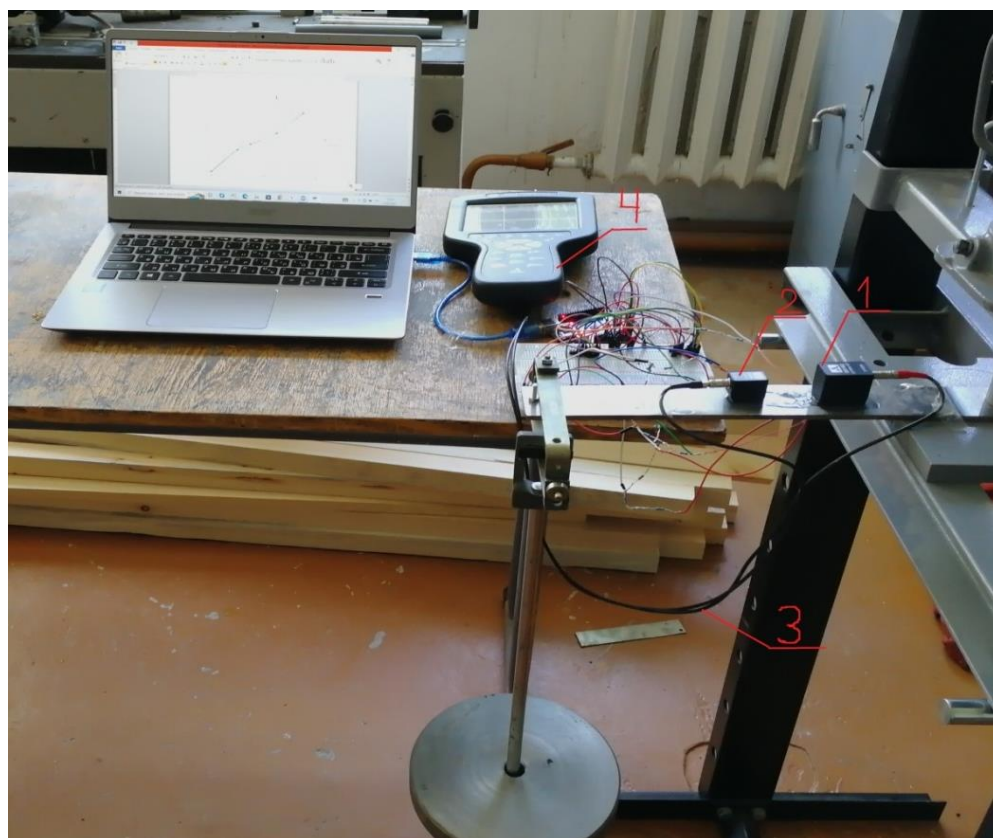


Рисунок 5.2 – Общий вид системы контроля НДС с использованием пьезопреобразователей: 1 – излучающий ПЭП; 2 – приемный ПЭП; 3 – соединительный кабель; 4 – дефектоскоп

Исследование акустоупругого эффекта проводилось на таком же образце, что и в разделе 4. Создание поверхностной ультразвуковой волны Рэлея осуществлялось с применением ПЭП фирмы «Атлас» – S5182 с частотой колебаний 2,5 МГц. Длина волны, распространяющаяся со скоростью приблизительно 3000 м/сек равна 1,5 мм, что дает возможность проводить контроль образца толщиной 5 мм, так как глубина проникновения поверхностной ультразвуковой волны в ОК равняется 1,5 – 2 длины волны. Возбуждение акустического пучка с излучаемого преобразователя и регистрация сигнала с приемного ПЭП осуществлялось с применением дефектоскопа A1212 MASTER.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем:

1. Одним концом объект контроля устанавливался в захват штока гидравлического пресса, второй конец оставался свободным для его последующего нагружения.
2. Излучающий и приемный пьезопреобразователи устанавливались на фиксированное расстояние друг от друга на стороне образца, где происходило растяжение.
3. После включения дефектоскопа настраиваем прибор таким образом, чтобы на экране отображалась осциллограмма сигнала от прошедшего в образце импульса упругих волн.
4. Фиксируем отсчетную точку в сигнале с приемного ПЭП с разрешением по времени 1 нсек.
5. Постепенно нагружаем пластину грузом, измеряя перемещение свободного конца в мм.
6. Фиксируем сдвиг осциллограммы относительно отсчетной точки в нсек. Появление задержки в этом случае будет означать изменение скорости ультразвуковых волн в ОК.
7. Фиксируем 5 значений задержки при каждом нагружении образца.
8. Устанавливаем пьезопреобразователи на поверхность образца, где происходит его сжатие и повторяем пункты 2 – 7.

Результаты экспериментов приведены в таблице 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 – Результаты эксперимента при установке ПЭП в месте растяжения образца

Масса груза, кг	0	8	13	18	23	28	33	38	43
Перемещение конца балки δ , мм	0	13	15,5	20,2	25,33	28,56	31,85	37,64	48,37

Продолжение таблицы 5.1

Масса груза, кг	0	8	13	18	23	28	33	38	43
Перемещение конца балки δ , мм	0	13	15,5	20,2	25,33	28,56	31,85	37,64	48,37
Задержка ультразвуковой волны t , нсек	0	10	12	16	20	23	26	31	40
	0	9	9	13	16	17	20	22	31
	0	7	9	12	14	16	19	22	27
	0	6	8	10	13	15	16	20	25
	0	6	8	10	13	15	16	20	25
Среднее значение задержки t_{cp} , нсек	0	7,6	9,2	12,2	15,2	17,3	19,4	23	29,6

Таблица 5.2 – Результаты эксперимента при установке ПЭП в месте сжатия образца

Масса груза, кг	0	8	13	18	23	28	33	38	43
Перемещение конца балки δ , мм	0	13	15,5	20,2	25,33	28,56	31,85	37,64	48,37
Задержка ультразвуковой волны t , нсек	0	17	22	28	35	39	44	54	68
	0	20	24	31	39	44	49	57	74
	0	22	27	35	44	49	55	66	83
	0	23	28	35	44	53	58	65	85
	0	25	31	42	53	57	64	76	98

Продолжение таблицы 5.2

Масса груза, кг	0	8	13	18	23	28	33	38	43
Перемещение конца балки δ , мм	0	13	15,5	20,2	25,33	28,56	31,85	37,64	48,37
Среднее значение задержки t_{cp} , нсек	0	21,4	26,4	34,2	43	48,4	54	63,6	81,6

Из таблицы 5.1 видно, что при установке пьезопреобразователей на поверхность образца, где происходит его растяжение, задержка волн Рэлея уменьшается, при его сжатии же наоборот происходит увеличение задержки (таблица 5.2).

Величину напряжения в месте установки ПЭП определяем по формуле, которая используется для теоритического расчета:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (5.1)$$

где ε – деформации в точке расположения ПЭП;

E – модуль упругости образца, МПа.

Расчет деформаций проводится по формуле:

$$\varepsilon = \frac{3}{2} \frac{ah}{l^3} \delta, \quad (5.2)$$

где a – расстояние от свободного конца изгибаемого элемента до места установки ПЭП;

h – толщина балки, мм;

l – длина балки, мм;

δ – перемещение конца балки, мм.

Подставив формулу (5.2) в (5.1) получим:

$$\sigma = \frac{3 ah}{2 l^3} \delta \cdot E. \quad (5.3)$$

Результаты расчета представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты теоретического расчета напряжений в месте установки ПЭП

Масса груза, кг	Перемещение конца балки δ , мм	Деформации ε	Напряжение σ , МПа
0	0	0	0
8	13	0,00014	29,5
13	15,5	0,00021	44,4
18	20,2	0,00028	56,2
23	25,33	0,00035	68,9
28	28,56	0,00040	78,8
33	31,85	0,00044	86,7
38	37,64	0,00051	100,5
43	48,37	0,00066	129

Взяв средние значения задержки, а также рассчитанные напряжения, можно построить градуировочный график их зависимости (рисунок 5.3). Данный график доказывает линейность полученных значений с вероятностью более 90%, что говорит о правильности проведенного эксперимента.

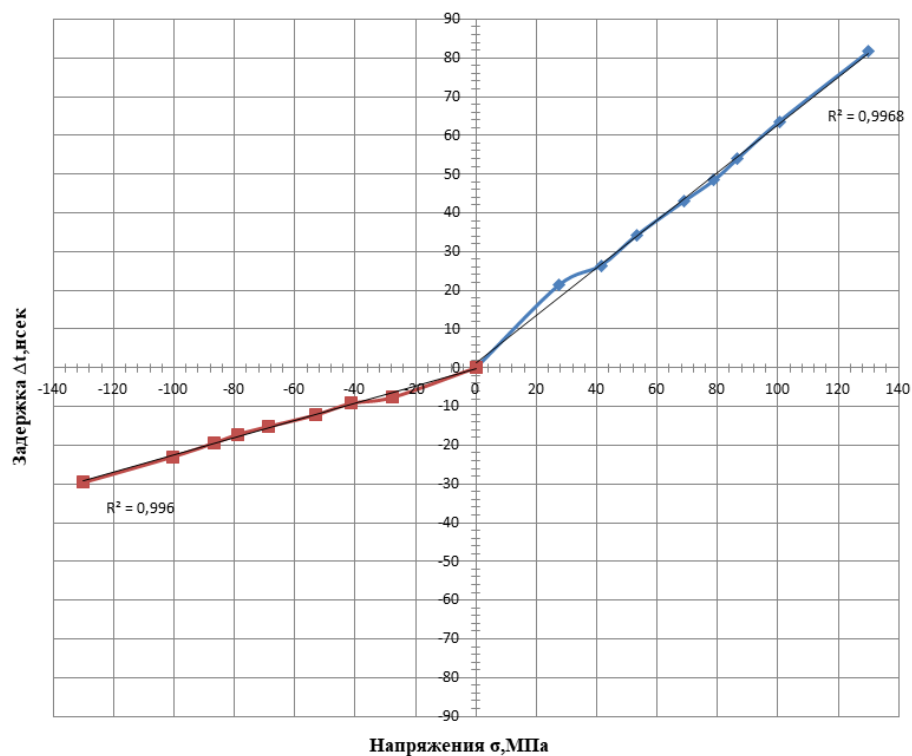


Рисунок 5.3 – График зависимости задержки волн от напряжений

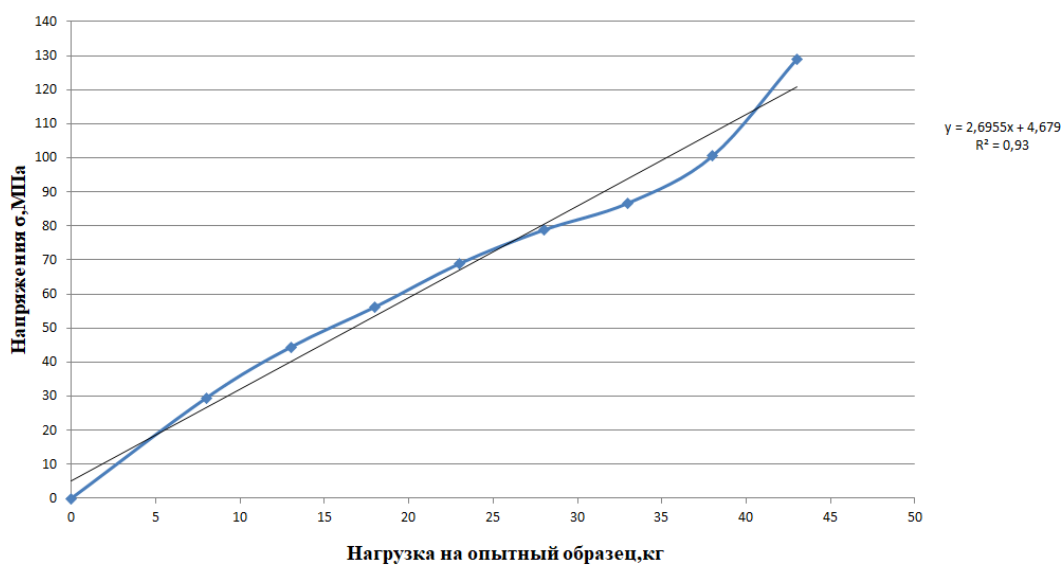


Рисунок 5.4 – График зависимости теоретических значений напряжения от прикладываемой нагрузки

Также в результате расчетов, приведенных в таблице 5.3, была получена зависимость теоретических значений напряжений, которые возникают в образце от приложенных к нему нагрузок (рисунок 5.4).

5.2 Оценка адекватности модели трех экспериментов

Ниже приведены графики зависимости напряжений от нагрузки, которые были получены в результате проведения трех экспериментов в разделах 3, 4 и 5 соответственно.

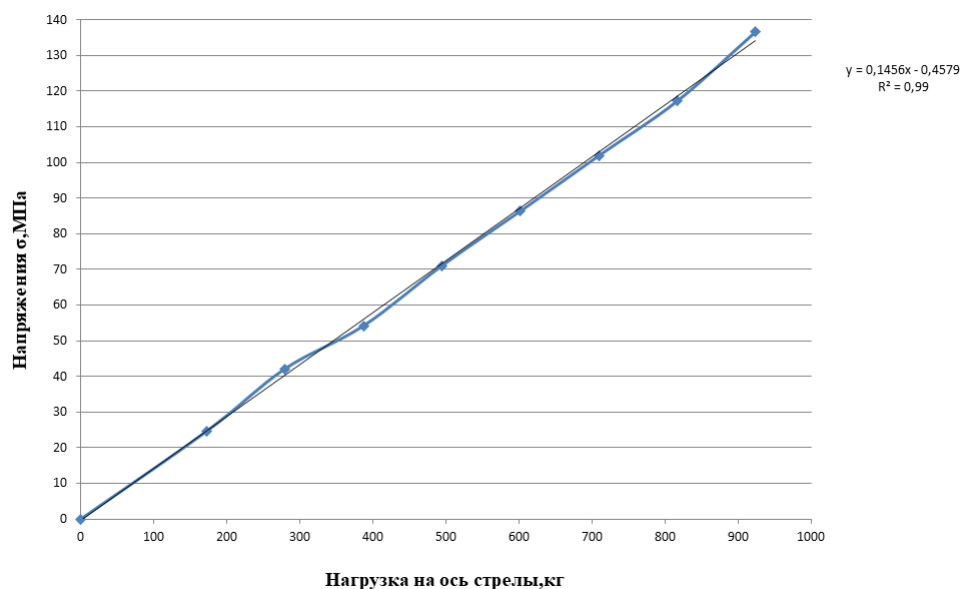


Рисунок 5.5 – Зависимость напряжений от прикладываемой нагрузки при моделировании в SolidWorks

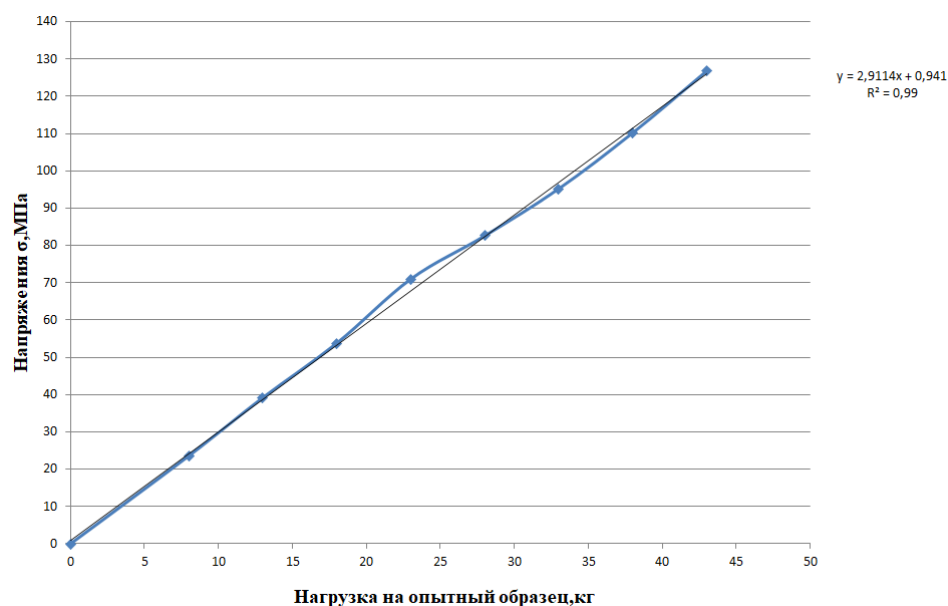


Рисунок 5.6 – Зависимость напряжений от прикладываемой нагрузки при использовании тензодатчиков

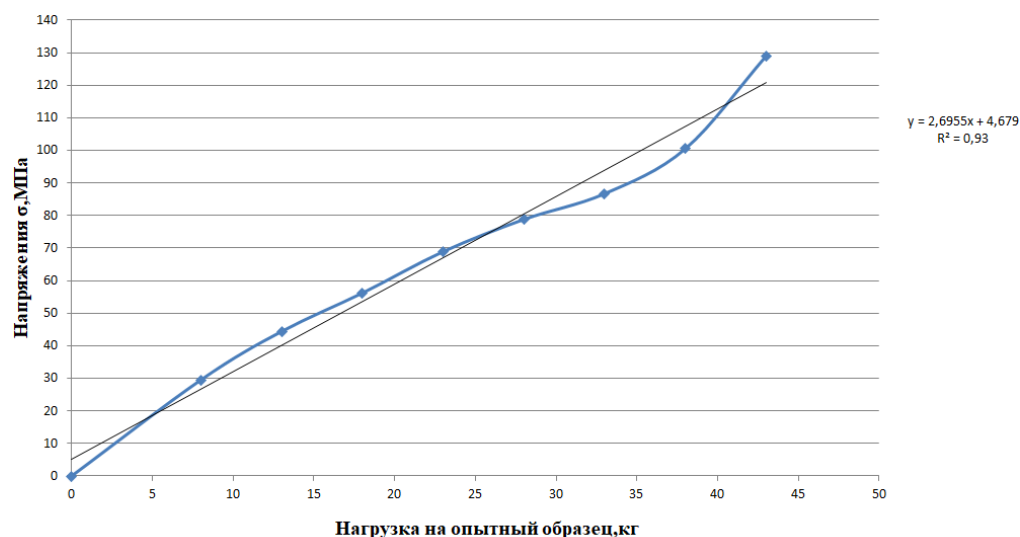


Рисунок 5.7 – Зависимость теоретических значений напряжений от прикладываемой нагрузки при использовании пьезопреобразователей

Адекватность модели всех трех экспериментов можно оценить по полученному к каждому графику коэффициенту корреляции (R^2), который принимает следующие значения:

- 1) При использовании программы SolidWorks: $R^2 = 0,99$;
- 2) При использовании тензорезисторов: $R^2 = 0,99$;
- 3) При использовании пьезопреобразователей: $R^2 = 0,93$.

Проанализировав данные значения коэффициентов, можно сделать вывод, что полученная зависимость теоретических напряжений от нагрузки на образец с использованием УЗД на 6% отличается от зависимостей, полученных в ПО SolidWorks и опытным путем с применением тензодатчиков.

Поэтому учитывая тот факт, что полученные зависимости не должны отличаться друг от друга более чем на 5%, проведение достоверного контроля на определение НДС конструкции с использованием УЗД должно быть основано на взаимосвязи средней задержки ультразвуковой волны и напряжений, полученных опытным путем с применением датчиков изгиба (тензорезисторов) при соответствующей величине нагрузки на объект контроля.

6 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Ультразвуковые волны могут провоцировать биоэффекты различной направленности, вариации которых зависят от нескольких факторов: интенсивности ультразвукового сигнала, его частоты, временных интервалов, и особенно степени чувствительности принимающей поверхности.

Регулярное воздействие ультразвуковых частот на сотрудников, при условии, что сигнал превышает разрешенные и безопасные параметры, может вызывать серьезные последствия для здоровья, в том числе, затрагивающие нервную, эндокринную и сердечно–сосудистую системы.

6.1 Гигиеническая классификация ультразвука и его нормирование

Чтобы привести все существующие критерии и методы оценивания условий труда была разработана систематизация ультразвука, который оказывает воздействие на человеческий организм при работе с ним (СанПиН 2.2.4/2.1.8.582–96 «Гигиенические требования при работах с источниками воздушного и контактного ультразвука промышленного, медицинского и бытового назначения») [15].

Источники воздействия по типам делятся на ручные и стационарные, а по способу распространения на контактные и воздушные. При контактном способе необходимо непосредственное прикосновение открытых участков тела с источником, при воздушном этого не требуется, так как волны воздействуют на человека дистанционно. Также важным показателем по классификации является спектральная характеристика ультразвуковых колебаний:

- низкая частота – 16–63 кГц;
- средняя частота – 125–250 кГц;
- высокая частота – 1,0–31,5 МГц [15].

Одним из немаловажных пунктов обеспечения безопасности сотрудников, работающих с ультразвуковыми волнами, является нормирование. Гигиеническое нормирование ультразвуковых волн начинается с определения фактора, оказывающего воздействие на здоровье сотрудника, как

неблагоприятного. В связи с этим определяются безопасные (допустимые) нормы воздействия по различным параметрам.

В таблице 6.1 обозначены пиковые значения воздушного и контактного ультразвука на рабочих местах или в зонах контакта частей тела человека с источниками колебаний, либо в среде в которой они распространяются.

Таблица 6.1 – Пиковые значения воздушного и контактного ультразвука на рабочих местах

Воздушный ультразвук		
Среднегеометрические частоты третьоктавных полос, кГц	Уровни звукового давления, дБ	
12,5	80	
16	90	
20	100	
25	105	
31,5-100	110	
Контактный ультразвук		
Среднегеометрические частоты октавных полос, кГц	Пиковые значения виброскорости, м/с	Уровни виброскорости, дБ
8-63	0,005	100
125-500	0,0089	105
1000-31500	0,016	110

6.2 Общие требования безопасности, предъявляемые во время работы с ультразвуком

Согласно ГОСТу 12.1.001–89 «Ультразвук. Общие требования безопасности», все работы с дефектоскопами и вспомогательными устройствами должны производиться строго по инструкциям эксплуатации.

Категорически запрещено оставлять устройство в работающем состоянии без присмотра квалифицированного персонала [16].

Токоведущие узлы должны быть огорожены.

Переносной провод необходимо фиксировать в таком положении, чтобы он был максимально защищен от попадания влаги, масла или любого вида повреждения, запрещено наступать на провод. В процессе проведения УЗД, провода не должны натягиваться, провисать или волочиться по земле.

Любые подключения должны быть произведены только после устойчивой фиксации узлов.

Для удобства проведения визуального осмотра и повышения безопасности работы все детали, которые подлежат проверке необходимо фиксировать так, чтобы к ним можно было без затруднения получить свободный доступ [16].

Каждая деталь, подлежащая дефектоскопированию должна быть тщательно зачищена до основного металла. Эти работы необходимо производить строго в защитных очках или с использованием лицевого щитка.

При ощущении электрического тока в случае соприкосновения с корпусом прибора необходимо немедленно прекратить работу, выключить устройство от сети питания и сообщить о произошедшем руководителю.

После проведения неразрушающего контроля необходимо отключить устройство от сети питания и провести очистку всех деталей и инструментов с которыми была осуществлена работа. После чего необходимо провести профилактику согласно техническим документам.

Все инструменты и приборы должны быть убраны в специально для этого отведенные места. Дефектоскопист обязан прибрать место работы, собрать отходы и поместить в защищенное место хранения отработанных материалов.

Также необходимо вымыть с мылом руки, лицо и другие участки тела, куда попали загрязнения в процессе работы. После чего рекомендуется принять полноценный душ.

Запрещено применять для очистки кожи, спецодежды, спецобуви керосин или любые другие токсичные нефтепродукты. На кожу рекомендуется наносить уход в виде индифферентных мазей или кремов.

После проведения контроля рекомендуется согласно указаниям врача пройти необходимые процедуры, направленные на улучшение состояния здоровья [16].

6.3 Средства индивидуальной защиты, необходимые для проведения ультразвукового контроля

Комплект СИЗ для специалиста по ультразвуковому контролю согласно приказу Министерства труда и социальной защиты РФ от 9 декабря 2014 года №997н должен состоять из: фартука на основе просвинцованной резины, перчаток с полимерным покрытием, резиновых сапог с защитным подноском, диэлектрических перчаток и защитных очков [17].

Необходимо чтобы все СИЗ подходили по росту и размеру. Также важно тщательно и аккуратно экипироваться:

- быть застегнутым на все пуговицы;
- не оставлять свисающих рукавов или свободных концов одежды.

Сотрудник ни в коем случае не должен снимать спецодежду или обувь в течение всего рабочего времени.

Еще одним немаловажным аспектом является проверка средств индивидуальной защиты на их работоспособность перед каждым использованием:

- провести визуальный осмотр, чтобы зафиксировать цельность поверхностей и соединительных элементов;
- провести тестовое использование в безопасной обстановке.

Не разрешается пользоваться СИЗ, у которых истек срок годности, а также категорически запрещено применять диэлектрические перчатки с любыми дефектами [17].

7 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

7.1 Затраты на определение НДС агрегата в программе SolidWorks

В данном пункте производится расчет затрат на проведение анализа непосредственно организацией.

Необходимые затраты для осуществления работ в SolidWorks:

- Приобретение ПК с минимальными системными требованиями для корректной работы программы – средняя стоимость на июнь 2022 года составляет 50000 рублей;
- Покупка лицензии SolidWorks 2022 Standart – цена на июнь 2022 года составляет 518364 рубля;
- Обучающие курсы по работе в SolidWorks (72 академических часа) – цена на июнь 2022 года составляет 20500 рублей;
- Заработная плата сотрудника организации – данные затраты будут рассчитаны по следующей формуле:

$$\text{Заработная плата} = \frac{\text{Оклад} \cdot k_p \cdot \text{КОД}}{\text{КРД}} - \text{НДФЛ}, \quad (7.1)$$

где оклад – это фиксированная выплата за полностью отработанный месяц без учета надбавок. Оклад инженера эксплуатации в среднем составляет 50000 рублей в месяц;

k_p – районный коэффициент к з/п, для Амурской области составляет 1,3;

КОД – количество дней отработанных сотрудником за месяц;

КРД – количество рабочих дней в июне 2022 года по производственному календарю (22 дня).

Подставив все значения в формулу (7.1) получим:

$$\text{Заработная плата} = \frac{50000 \cdot 1,3 \cdot 22}{22} - \text{НДФЛ} = 65000 - \left(\frac{65000 \cdot 13\%}{100\%} \right) = 56550, \text{ рублей.}$$

Итого затраты организации на первый месяц составят: 645414 рублей, на последующие месяцы: 56550 рублей.

7.2 Затраты на определение НДС конструкции с использованием УЗД

С целью определения напряженно–деформированного состояния при помощи УЗД необходимо приобрести следующие комплектующие:

- Ультразвуковой дефектоскоп А1212 MASTER – цена на июнь 2022 года составляет 399000 рублей;

Количество – 1 штука.

- Кабель LEMO – LEMO двойной 1,2 м – цена на июнь 2022 года составляет 10000 рублей;

Количество – 1 штука.

- Наклонный пьезопреобразователь S5182 с частотой 2,5 МГц – цена на июнь 2022 года составляет 11500 рублей;

Количество – 2 штуки.

- Контактный гель от компании «Клевер» 250 мл – цена на июнь 2022 года составляет 300 рублей;

Количество – 1 штука.

Помимо затрат на комплектующие, необходимо учитывать заработную плату работника, осуществляющего данный контроль, а также найм специалиста по проведению тензометрического расчета, цена за услугу которого в среднем составляет 2500 рублей. Наличие штатного работника, занимающегося тензометрией для компании нецелесообразно, так как данный контроль нужно провести всего лишь один раз, что касается дефектоскописта, то его наличие будет выгодным для компании, в связи с тем, что мониторинг конструкции необходимо проводить регулярно.

Также взяв во внимание тот факт, что средний оклад специалиста по ультразвуковому контролю на Дальнем Востоке составляет 50000 рублей, величина заработной платы в месяц, как и в пункте 7.1 также составит 56550 рублей.

Итого общая сумма затрат компании в первый месяц составит: 497005 рублей, в последующие месяцы: 56550 рублей.

Исходя из полученных суммарных затрат на проектирование модели и проведение необходимых испытаний в среде SolidWorks, а также затрат на определение НДС конструкции ультразвуковым методом, можно подсчитать разницу затрат в процентном соотношении между ними по формуле:

$$\Delta_{затрат} = \frac{\sum_{затраты \text{ для SolidWorks}} - \sum_{затраты \text{ для УЗД}}}{\sum_{затраты \text{ для SolidWorks}}}.100\%. \quad (7.2)$$

Подставив соответствующие величины в формулу (7.2), получим:

$$\Delta_{затрат} = \frac{645414 - 497005}{645414}.100\% = 23\%.$$

Осуществив расчет затрат, можно сделать вывод, что внедрение в компанию специалиста по работе в среде SolidWorks на 23% затратнее, чем человека, специализирующегося на проведении ультразвуковой диагностики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы были рассмотрены различные методы ультразвуковой диагностики, на применении которых базируется непосредственно та или иная система мониторинга. Исходя из данного анализа наиболее подходящим в плане доступности и простоты использования выступил эхометод, также его использование дает возможность не только выявлять дефекты, но и осуществлять исследования на определение напряженно–деформированного состояния конструкции на основе эффекта акустоупругости.

Также были изучены принципы построения существующих систем мониторинга, которые имеют строгую структуру, начиная от определения наиболее уязвимых зон конструкции, подбора необходимых устройств, заканчивая различными инженерными расчетами.

В программной среде SolidWorks спроектирована 3D модель подъемного устройства, а также определена одна из наиболее уязвимых зон конструкции, которой является верхняя часть первого блока стрелы агрегата. Также было проведено 10 статических исследований под углами наклона стрелы от 0 до 90 градусов с постоянной нагрузкой на ось агрегата равной 20 килограмм, по результатам анализов был определен потенциально опасный угол, который составил 0 градусов, при таком расположении возникали максимальные по величине напряжения в $\sigma = 5,8$ МПа.

Разработана система сбора данных НДС с использованием тензодатчиков, то есть подобраны необходимые комплектующие, спроектирована схема тарировки и выбрано наиболее подходящее расположение датчиков на объекте контроля. Проведение эксперимента с датчиками изгиба на образце из стали 10ХСНД позволило определить зависимость напряжений, возникающих на пластине от прикладываемой к ней нагрузки. Полученные значения напряжений были необходимы для их дальнейшего использования при проведении УЗД.

Выбрана подходящая аппаратура для проведения исследований с использованием метода акустоупругости. И соответственно проведен эксперимент по результатам которого получены средние значения задержки ультразвуковой волны в наносекундах при постепенном нагружении образца. Выведен график зависимости теоретических значений напряжений от нагрузки, который в результате сравнивался по коэффициентам корреляции с аналогичными зависимостями, полученными при моделировании в SolidWorks и при использовании тензорезисторов. Оценка адекватности модели по трем графикам позволила определить, что зависимость теоретических напряжений от нагрузки на образец при использовании УЗД на 6% отличается от зависимостей, полученных при моделировании и использовании датчиков изгиба. Учитывая то, что различие между опытами не должно превышать 5%, проведение контроля методом акустоупругости должно базироваться на взаимосвязи средней задержки ультразвуковой волны и полученных опытным путем напряжений с применением тензодатчиков.

Подведены итоги общих затрат на проведение контроля в SolidWorks, которые составили 645414 рублей и с использованием УЗД, равные 497005 рублей. Разность затрат составляет 23%, поэтому определение НДС конструкции с применением ультразвука является наиболее выгодным вариантом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Самосудов П. А. Система мониторинга технического состояния строительных конструкций уникальных зданий и сооружений/ФГБОУ ВО «СибАДИ», 2019.С. 20–56.

2 Сергеев С. В., Воробьев Е. Д. Информационно–измерительная система мониторинга напряженно-деформированного состояния несущих строительных конструкций и сооружений/Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, 2017. С. 3–6.

3 Автономная система мониторинга напряженно–деформированного состояния магистрального трубопровода [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.premierdevelopment.ru/avtonomnaya-sistema-monitoringa-napryzheny-truboprovoda.html> (дата обращения: 12.02.2022).

4 Зацепин А. Ф. Акустический контроль/учебное пособие/Уральский федеральный университет имени Президента России Б.Н. Ельцина, 2016. С. 132–203.

5 Забродин В. П., Серегин А. А., Суханова М. В., Портаков А. Б. Экспериментальные методы определения напряжений и деформаций: учебное пособие/Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2017. С. 34–41.

6 Антонов И. С., Беликов Г. В. Руководство к выполнению лабораторных работ по сопротивлению материалов. Ч.1: методические указания/Ульяновск: УлГУ, 2009. С. 22–25.

7 Основные понятия анализа, численный метод анализа технических конструкций, справка по SolidWorks [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://help.solidworks.com/2013/russian/SolidWorks/cworks> (дата обращения: 20.03.2022).

8 Мехеда В. А. Тензометрический метод измерения деформаций: учебное пособие/Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. С. 50–53.

9 Миляев В. Д., Казанцев В. Г. Определение напряжений в балке равного сопротивления изгибу: методические рекомендации к выполнению лабораторной работы по курсам «Сопротивление материалов» и «Прикладная механика» для студентов механических и технологических специальностей/ БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2014. С. 9–11.

10 Атаров Н.М. Сопротивление материалов в примерах и задачах, М.: Инфра-М, 2010. С. 137–176.

11 Андреев В.И., Паушкин А.Г., Леонтьев А.Н. Техническая механика. М.: Высшая школа, 2010. С. 68–79.

12 Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1995. С. 308–315.

13 Бехер С. А. Использование тензометрического метода для определения технического состояния ходовых частей вагона в движении//Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2007. С. 7–13.

14 Клокова Н. П. Тензорезисторы: Теория, методики расчета, разработки. – М.: Машиностроение, 1990. С. 208–214.

15 Гигиенические требования при работах с источниками воздушного и контактного ультразвука промышленного, медицинского и бытового назначения [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200000154> (дата обращения: 23.03.2022).

16 ГОСТ 12.1.001–89 Ультразвук. Общие требования безопасности. Москва: издательство стандартов.

17 Типовые нормы бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам с вредными или опасными условиями труда [электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420240108> (дата обращения: 28.03.2022).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинг программы «Измерение напряжения с использованием тензодатчиков»

```
#include <Adafruit_ADS1X15.h>

//конструкторы объектов АЦП
Adafruit_ADS1115 ads1;
Adafruit_ADS1115 ads2;

void setup(void)
{
  Serial.begin(9600);
  //старт АЦП 1
  // gnd - 0x48
  // 5v - 0x49
  if (!ads1.begin(0x48))
  {
    Serial.println("Failed to initialize ADS1.");
    while(1);
  }
  //старт АЦП 2
  if(!ads2.begin(0x4A))
  {
    Serial.println("Failed to initialize ADS2.");
    while(1);
  }
  //включаем единичное усиление АЦП 1 и 2
  ads1.setGain(GAIN_ONE);
  ads2.setGain(GAIN_ONE);
}

void loop(void)
{
```

```
//переменные для результатов
int16_t results1, results2, results3;
//множитель для конвертирования показаний АЦП в напряжение
float multiplier = 0.125F;
//получаем данные с дифференциальных входов АЦП 1 и 2
results1 = ads1.readADC_Differential_0_1();
results2 = ads1.readADC_Differential_2_3 ();
results3 = ads2.readADC_Differential_0_1();
//получаем результаты измерения напряжения
Serial.print("Значение ПЕРВОГО тензодатчика: ");
Serial.print(results1 * multiplier);
Serial.println(" mV");
Serial.print("Значение ВТОРОГО тензодатчика: ");
Serial.print(results2 * multiplier);
Serial.println(" mV");
Serial.print("Значение ТРЕТЬЕГО тензодатчика: ");
Serial.print(results3 * multiplier);
Serial.println(" mV\n");
delay(500);
}
```