

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 » сентября 2022 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Определение напряженно-деформированного состояния на основе ультразвуковых средств измерения

Исполнитель

студент группы 817-об

Грушко 08.06.2022
(подпись, дата)

А. С. Грушко

Руководитель

доцент, канд. тех. наук

Соловьев 08.06.2022
(подпись, дата)

В.В. Соловьев

Консультанты:

по БЖД

доцент, канд. тех. Наук

Козырь 08.06.22 г.
(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль

Ассистент кафедры СИТРК

Ареков 08.06.22
(подпись, дата)

М.А. Ареков

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
« 26 » 05 2022 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студентку Грушко Артема Сергеевича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Определение напряженно-деформированного состояния на основе ультразвуковых средств измерения.

(утверждена приказом от 05.04.2022 №679-уч)

2. Срок сдачи студенткой законченного проекта: 8.06.2022

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

4. Содержание выпускной квалификационной работы: расчет НДС в металлических конструкциях и выявления самой нагруженной детали ТУА, обзор существующих методов расчета дефектов металлов, составление технологической карты максимально нагруженного участка ТУА, безопасность жизнедеятельности, экономическая часть.

5. Перечень материалов приложения: титульный лист, цель и задачи работы, блок-схема «Порядок настройки геометрии стрелы», блок-схема «Последовательность создания сетки», блок-схема «Последовательность настройки динамического анализа», общая деформация стрелы при подъеме от 0 до 90 градусов, эквивалентное напряжение, расчет НДС акустическим методом, заключение.

6. Консультант 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 выпускного квалификационного проекта: Соловьев Владислав Викторович, доцент, канд. тех. наук.

Задание принял к исполнению (дата): 26.05.2022 *Гусев*

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 62 с., 25 рисунков, 5 таблицы, 8 источников.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ, УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ, ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНЫЙ АГРЕГАТ, ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА

В качестве главного акустического метода неразрушающего контроля используется контроль ультразвуком. Суть неразрушающего контроля сводится к диагностированию надежности рабочих параметров строений с помощью методов, не приводящих к его разрушению. Непосредственно перед контролем необходимо провести процедуру исследования на наличие напряженно-деформированных состояний. Она поможет выявить наиболее уязвимые места, по каждому из которых впоследствии составляется специальная акустическая модель. Модель помогает понять, как именно будут распространяться ультразвуковые волны внутри строения. Это позволяет собрать сведения для создания особой базы данных и проанализировать, куда лучше установить датчики.

Цель работы: проведение оценки напряженно-деформированного состояния транспортно-установочного агрегата при помощи проведения динамического анализа, а также определить при помощи ультразвука НДС для самой нагруженной детали ТУА.

Задачи работы:

- построить компьютерную модель стрелы транспортно-установочного агрегата в программном комплексе Ansys
- провести динамический анализ стрелы транспортно-установочного агрегата и выявить самые нагруженные участки;

- рассчитать напряженно-деформированное состояние для самого нагруженного участка стрелы транспортно установочного агрегата;
- провести расчет затрат на проведение напряженно-деформированного состояния.

СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	8
Введение	9
1 Общие сведения напряженно-деформированного состояния	10
1.1 Методы неразрушающего контроля	10
1.2 Ультразвуковой метод НК	12
1.3 Ультразвуковая толщинометрия	15
1.4 Импедансные дефектоскопы и твердомеры	15
1.5 Пьезоэлектрический преобразователь	16
1.6 Электромагнитно-акустические преобразователи	16
2 Метод конечных элементов	19
2.1 Введение в МКЭ	19
2.2 Основы МКЭ	19
2.3 Достоинства и недостатки МКЭ	24
3 Основы моделирования в пакете Ansys	25
3.1 Введение в пакет Ansys	25
3.2 Работа в Workbench	26
4 Динамический анализ стрелы ТУА	28
4.1 Нагрузки и закрепления стрелы ТУА	28
4.2 Результаты анализа стрелы ТУА	31
5 Определение НДС акустическим методом НК	45
5.1 Расчет НДС акустическим методом НК	45
5.2 Составление протокола измерений	49
6 Безопасность жизнедеятельности	50
6.1 Источники, классификация и характеристики ультразвука	50
6.2 Нормирование ультразвука	50
6.3 Требование безопасности перед началом работы	52
6.4 Требование безопасности во время работы	53

6.5	Требование безопасности в аварийной ситуации	53
6.6	Требование безопасности по окончанию работы	54
7	Экономическая часть	56
7.1	Затраты на определение НДС агрегата в Ansys	56
7.2	Затраты на оборудование для ультразвуковой дефектоскопии	57
7.3	Затраты на оборудования для ультразвуковой дефектоскопии с использованием ЭМАП	58
	Заключение	60
	Библиографический список	61

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

УЗК – ультразвуковой контроль;

МКЭ – метод конечных элементов;

НК – неразрушающий контроль;

НДС – напряженно-деформированное состояние;

КЭ – конечные элементы;

ПО – программное обеспечение.

ВВЕДЕНИЕ

На практике для неразрушающего контроля часто применяют акустический метод. Существует несколько вариантов этих методов, которые подробно изучены и расписаны в более ранних исследованиях и работах. Также для них выпускается соответствующая техника.

Область стремительно развивается. Поскольку используемые методы и устройства показывают высокую эффективность при проведении дефектоскопии различных объектов. А использование виртуальных моделей и компьютерных технологий значительно ускоряет темпы развития, позволяя создавать новые методы на основе старых. Но это требует от исследователей решения определенных задач. В том числе разработки алгоритмов построения акустических полей, которые создаются под влиянием ультразвука. Для этого важно принимать в расчет несколько параметров:

- акустические характеристики, форму;
- дисперсию;
- интерференционные эффекты;
- воздействие дефектов на распространение ультразвуковых волн.

Аналитические методы для подобной задачи слишком громоздкие и трудновыполнимые, поэтому для решения получаемых дифференциальных уравнений широко используется метод конечных элементов. Благодаря которому при помощи ЭВМ можно сократить время решения данных задач.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

Напряженно-деформированное состояние (НДС) – это совокупность деформаций и напряжений, которые возникают при воздействии на объект внешних сил (температурных нагрузок, давления или эрозии). В том числе использование конструкций из металла связано с возникновением различных факторов, оказывающих прямое влияние на их НДС. Сложность заключается в том, что эти НДС не всегда можно учесть на этапе проектирования и проведения предварительных расчетов.

НДС свойственно менять со временем, это может быть связано с рядом непредвиденных обстоятельств: использование некачественных стройматериалов, ошибок при вычислениях на этапе проектирования и проч. Поэтому НДС анализируется в процессе эксплуатации объекта, это позволяет получить актуальные данные. Анализ выявляет уязвимые места и дефекты. Для этого используются особые технические устройства, специально разработанные для поиска НДС.

1.1 Методы неразрушающего контроля

Чтобы определить напряженно-деформированные состояния используются специально-разработанные методы неразрушающего контроля (НК). Их особенность в щадящем воздействии на объект, т. е. конструкция не испытывает существенных воздействий, оказывающих негативное влияние на ее прочность или целостность. Также их применение не сопряжено с механическим воздействием – объект продолжает функционировать в привычном режиме. ГОСТом 18353–79 определяется 9 основных видов НК:

- используемые для обнаружения внешних дефектов: магнитный, оптический, с использованием проникающих веществ, вихретоковый;
- для обнаружения внутренних дефектов: радиоволны, с использованием электричества, тепловых волн, радиации, акустики.

Каждый вид имеет собственное физико-химическое основание, которое позволяет выявлять НДС:

1. Магнитный использует в качестве основы магнитное поле, которое вступает во взаимодействие с объектом.

2. Вихрековый (электромагнитный) применяется в основном для объектов из электропроводящих стройматериалов. Для метода требуется создать вихрековое поле внутри объекта и провести регистрацию его взаимодействия с аналогичным полем в специальном вихрековом преобразователе.

3. Оптический способ подразумевает регистрацию соответствующего излучения от объекта. Может регистрироваться собственное оптическое излучение или излучение, возникающее в процессе взаимодействия с объектом.

4. Метод с использованием проникающих веществ подразумевает применение особых компонентов, которые легко проникают внутрь дефектов, позволяя легко их обнаруживать. Для внешних дефектов, расположенных на поверхности, используется капиллярный способ, а для сквозных – течеискание.

5. Метод с использованием электричества предполагает регистрацию взаимодействия эл. поля с объектом или эл. поля, появляющегося на объекте из-за различных причин.

6. Метод радиоволн регистрирует, как именно меняются характеристики электромагнитного поля после взаимодействия с объектом.

7. Метод тепловых волн заключается в регистрации теплового поля, контраста и потока тепла в разных участках объекта.

8. Метод радиации использует ионизирующее излучение, которое проникает внутрь объекта и позволяет выявить после анализа дефекты или НДС. Существует несколько разновидностей, поэтому метод может носить уточняющее название, например рентгеновский радиационный метод использует именно рентгеновские волны.

9. Метод акустики анализирует, какие изменения возникают в акустическом поле объекта под определенным влиянием или каким акустическим по-

лем обладает объект. Если используемые акустические волны превышают порог в 20 кГц, то метод правильнее называть ультразвуковым.

Все 9 методов выявления напряженно-деформированных состояний позволяют:

- уточнить актуальные параметры объекта (толщину покрытий, плотность материалов их однородность);
- определить различные дефекты (грибки, расслоения, коррозионные разрушения);
- определить, насколько качественно выполнены сварные швы, различные соединения;
- понять, качественные ли были использованы лакокрасочные покрытия;
- определить, есть ли деформация или какое-либо отклонение в отдельных деталях объекта;
- провести процедуру дефектоскопии устройств длительного срока использования.

Неразрушающий контроль:

- минимизирует риск поломок и аварий, повышает безопасность использования различного оборудования;
- обеспечивает регулярный контроль на соответствие объекта всем требованиям НТД (нормативно-техническая документация);
- позволяет проводить своевременный контроль и выявление всех опасных отклонений в конструкции объекта, помогает определить уровень их опасности;
- обеспечивает качественный контроль всех этапов строительства.

Чаще всего из всех 9 методов неразрушающего контроля используется именно ультразвуковой метод.

1.2 Ультразвуковой метод НК

Впервые использовать ультразвук для неразрушающего контроля предложил советский ученый Соколов С. Я. в 1928 году. Широкое распространение метод получил благодаря его высокой эффективности при проверке сварных швов, которые используются во множестве изделий и объектов: рельсах, авиационных деталях, трубопроводах реакторов и проч. Поэтому с годами использование ультразвукового метода в процессе НК стало обязательным для ряда областей.

Неразрушающий контроль ставит перед исследователями определенные задачи, которые в свое время подтолкнули научное сообщество к разработке уникальных акустических методов. Впоследствии все эти методы были разделены на активные и пассивные (согласно ГОСТ 23829–85). Принципиальная разница между ними заключается в излучении акустических волн: активные методы самостоятельно излучают волны и принимают их, а пассивные только принимают.

В промышленных условиях для исследования металла ультразвуковым методом используют волны в диапазоне 0,5–10 МГц. Для выявления более мелких дефектов могут применяться волны с частотой до 20 МГц. Низкие частоты используются для:

- объектов с толстыми стенками;
- мониторинга качества отливок, сварных швов;
- крупнозернистых металлов.

Помимо прочего метод ультразвуковых волн обладает рядом преимуществ перед другими способами неразрушающего контроля:

- возможность обнаружить мелкие дефекты благодаря высокой чувствительности;
- экономическая выгода использования;
- безопасность и не токсичность для здоровья персонала;
- не требуется прерывать эксплуатацию объекта;
- применимо к различным материалам.

Но также у ультразвукового метода есть и свои недостатки:

- невозможно выявить точные размеры дефекта;
- НК крупнозернистого металла имеет свои нюансы, вызванные сложностью его исследования;
- металлическая поверхность требует предварительной подготовки перед воздействием на нее ультразвука;
- требуется постоянно использовать контактные жидкости для стабильности акустического воздействия.

Все насчитывается 6 методов ультразвукового неразрушающего контроля:

1. Прохождение – позволяет обнаружить дефекты в толще конструкции, вызванные нарушением однородности или расслоением.

2. Отражение помогает обнаружить дефекты, вызванные нарушением однородности, с точным определением места их расположения и размеров. Суть метода заключается в анализе отраженного от дефекта сигнала.

3. Импедансный метод позволяет контролировать качество сварных швов, клеевых/спаянных соединения, где тонкая обшивка присоединена к жесткому элементу.

4. Свободные колебания позволяют обнаруживать дефекты в толще конструкции.

5. Вынужденные колебания чаще всего используются для определения толщины или выявления коррозии/расслоения в тонких металлических участках.

6. Акустико-эмиссионный метод помогает зарегистрировать только образовавшиеся трещины или места, в которых с большой долей риска будут образовываться трещины из-за механических нагрузок. Метод также ранжирует выявленные дефекты по степени опасности.

Чаще остальных используется импульсный метод. Главное преимущество ультразвуковых методов неразрушающего контроля в их надежности и эффективности. Поскольку они помогают выявить не только дефекты, расположен-

ные на поверхности или залегающие не глубоко, но и дефекты, располагающиеся в толще конструкций.

В свою очередь акустический метод можно разделить на :

- теневой;
- зеркально-теневой;
- эхо-метод – возможно применение при одностороннем доступе.

Работа всех подтипов сводится к излучению в объект и последующему принятию ультразвуковых волн специальным оборудованием – ультразвуковым дефектоскопом и пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП).

1.3 Ультразвуковая толщинометрия

Этот метод измерения используется, если объект труднодоступен для механических замеров толщины. Например, ультразвуковая толщинометрия используется для замкнутых объектов, где нет доступа внутрь или есть только односторонний доступ. Современные устройства обеспечивают точность замеров до 0,001 мм и позволяют замерять толщину 1–50 мм.

Суть метода в фиксировании времени, за которое ультразвуковой импульс проходит сквозь объект, и последующем умножении полученного значения на коэффициент. Для каждого материала есть свой коэффициент, учитывающий скорость, с которой должна распространяться звуковая волна в конкретном материале.

1.4 Импедансные дефектоскопы и твердомеры.

В основе использования импедансного дефектоскопа лежит связь полного механического сопротивления (импеданса) объекта и качества стыков его элементов. Такие устройства помогают обнаруживать плохо проклеенные участки, расслойки, пустоты и проч. Импедансный метод также позволяет определять твердость металлических объектов и объектов, выполненных из специальных сплавов.

Метод относится к контактному: прибор замеряет режим колебаний преобразователя, когда он притрагивается к исследуемому объекту. Благодаря ам-

плитуде и резонансной частоте, которую показывает прибор, легко судить о твердости материала и проч.

Чаще всего используется метод прохождения и отражения, который применяет оба типа преобразователей (пьезоэлектрический и электромагнитно-акустический преобразователь).

1.5 Пьезоэлектрический преобразователь

Пьезоэлектрические устройства используют одноименный эффект, возникающий в кристаллах, керамике или пленке, и впоследствии трансформирующие электрические волны в механическую энергию и наоборот. Устройства по методу ввода делят на:

1. Контактные. Их применение возможно, только если между объектом и преобразователем находится слой из специальной контактной жидкости, толщина которого составляет четвертую часть используемой длины волны. Среди недостатков этого вида ПЭП – нестабильный контакт.

2. Иммерсионные. Часто применяют во время автоматического контроля небольших объектов с простой геометрией. Такой способ измерения также требует ввода слоя жидкости. Преимущества этого типа устройств – стабильный акустический контакт.

3. Контактно-иммерсионные. Устройства совмещают преимущества двух первых типов и состоят из небольшой иммерсионной ванны с эластичной мембраной, которая соприкасается с объектом напрямую или через слой контактной жидкости.

4. Щелевые или менисковые. Между объектом и преобразователем образуется тонкая щель (размером с 1 длину волны), в которой силами поверхностного натяжения удерживается контактная жидкость.

1.6 Электромагнитно-акустические преобразователи.

Электромагнитно-акустические преобразователи (ЭМАП) позволяют генерировать упругие волны непосредственно в металлической поверхности. Данное возмущение возбуждает упругую волну, проникая в кристаллическую структуру металла или другого материала. Упругие волны при взаимодействии

с магнитным полем (во время обработки процесса) образуют электрический ток в катушке ЭМАП.

Магнитоотрицательность создает дополнительные напряжения (для различных ферромагнитных материалов), увеличивающие уровень сигнала (в отличие от исследований с применением только силы Лоренца). При использовании разных комбинаций магнитов и электрических катушек, генерируются различные типы волн.

Основные преимущества технологии контроля с применением ЭМА по сравнению с традиционным ультразвуковым контролем.

Основные преимущества технологии контроля с применением ЭМА по сравнению с традиционным ультразвуковым контролем.

- Сухой контроль. Дает возможность осуществлять контроль горячих \ холодных объектов и использовать в автоматизированных производствах. Контактная жидкость не требуется.

- Технология ЭМА не восприимчива к состоянию поверхности (шероховатости, окисление, загрязнение и так далее), возможно проводить исследования через изоляцию.

- Применение технологии ЭМАП значительно облегчает и упрощает использование преобразователей, особенно если применяется автоматизированный контроль. Не требуется контактная жидкость, призмы и законы отражения не применяются.

- Возможность генерировать и создавать уникальные моды волн.

Технология ЭМА - единственная технология позволяющая генерировать поперечную волну SH waves (горизонтальная поляризация). Эта волна не распространяется через контактную жидкость, которая имеет низкую плотность. Данная технология является идеальной для использования направленных волн, которые применяются для контроля труб, прутков и пластин, а также позволяет генерировать волны Лэмба и направленные поперечные, горизонтальные волны под прямым углом. На контроль не влияет

угол ввода импульса, поэтому преобразователи не делятся на наклонные и прямые. Метод отлично подходит для генерирования:

- направленных волн, применяемых для контроля за трубами, прутками, пластинами;
- волн Лэмба;
- направленные поперечные или горизонтальные волны под прямым углом.

Контроль не зависит от угла ввода импульса, поэтому устройства не делят на наклонные и прямые. Для осуществления контроля этим методом необходима полная комплектация:

1. Ультразвуковой дефектоскоп.
2. Электромагнитно-акустический преобразователь.
3. Кабель с экраном.
4. Стандартные образцы №1, №2, №3.

2 МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

2.1 Введение в метод конечных элементов

В последние года для численного решения задач механики сплошных сред используется метод конечных элементов (МКЭ). В основе МКЭ приближенное численное решение физической задачи с помощью дискретизации объекта на конечное количество структур и кусочно-элементной аппроксимации исследуемых функций.

Историческими предшественниками МКЭ были различные методы строительной механики и механики деформируемого твёрдого тела, использующие дискретизацию, в частности, метод сил и метод перемещений. Основные идеи и процедуры МКЭ впервые были использованы Курантом в 1943 г. при решении задачи о кручении стержня. Но только с 50-х годов началось активное практическое применение МКЭ, сначала в области авиации и космонавтики, а затем и в других направлениях. Термин «конечные элементы» ввёл в 1960 году Клаф. Развитию этого метода способствовало совершенствование цифровых электронных вычислительных машин.

На практике это позволяет приближенно решить большое количество задач, которые в математике выражаются с помощью систем дифференциальных уравнений (или в вариационной постановке). В том числе с помощью МКЭ решаются следующие физические задачи:

- термический анализ;
- анализ НДС;
- гидрогазодинамические;
- из области электродинамики;
- прочие связанные задачи.

2.2 Основы МКЭ

В качестве исходника для метода конечных элементов берется область (материальное тело), разбиваемое на несколько частей (конечных элементов

или КЭ) (Рис. 1). Разбиение позволяет сформировать сетку из границ между элементами. Точки, где соприкасаются различные элементы, называются узлами. Также внутри элементов или на их границах могут создаваться дополнительные узлы. Совокупность всех конечных элементов и узлов является конечно-элементной моделью объекта. Важно, чтобы дискретная модель была максимально приближена по площади к реальному объекту, т. е. практически полностью его покрывала.

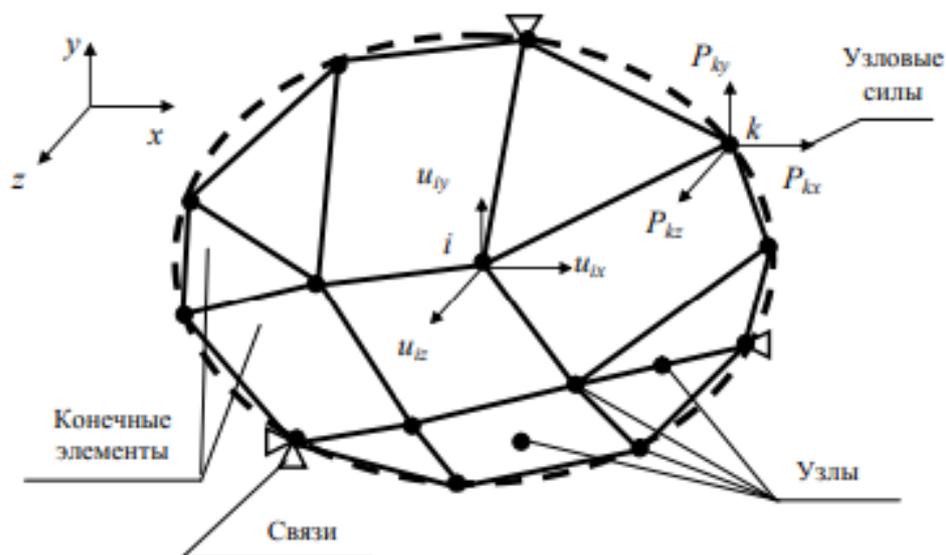


Рисунок 1 – Объект, разделенный на элементы

Форма, тип и размер конечного элемента не произволен, а зависит от формы и типа исследуемого НДС:

- в виде стержня используется для построения модели одноосного НДС, возникающего в результате растяжения, сжатия, кручения или изгиба;
- плоский двумерный конечный элемент применяется для построения модели плоского напряженного или деформированного состояний (это могут быть треугольные или четырехугольные пластины);
- объемные трехмерные конечные элементы (тетраэдры, шестигранники, призмы) применяются для исследования объемных напряженных состояний;

- конечные элементы в виде кольца удобны для осесимметричных напряженных состояний.

Для анализа одного объекта часто используются различные КЭ. Например, чтобы проанализировать изгиб пластины, необходимо взять плоский вариант конечного элемента, для оболочки – оболочечный или сгибаемый плоский вариант. В местах с наибольшим градиентом напряжения лучше брать мелкие конечные элементы или элементы более крупного порядка.

Каждый конечный элемент имеет свои свойства, зависящие от констант и опций. Например:

- стержневые ферменные элементы имеют площадь поперечного сечения;
- плоские несгибаемые элементы имеют толщину и им назначается конкретный вид НДС;
- плоские изгибаемые и оболочечные элементы имеют конкретную толщину.

Также каждый элемент и узел имеет свой номер. Нумерация узлов называется общей (глобальной), если используется в масштабах всей модели. И местной (локальной), если используется внутри группы конечных элементов. Рекомендуется нумеровать узлы и элементы так, чтобы это не усложняло вычисления. Для оптимизации нумерации даже были разработаны специальные алгоритмы.

Прежде чем приступать к расчетам полей величин необходимо определить используемые материалы (и какие элементы за них отвечают), а также назначить им конкретные свойства:

- задачи на деформирование требуют обязательно указывать упругие свойства – модуль упругости и коэффициент Пуассона;
- задачи с пластическим течением предполагают определение истинных диаграмм деформирования, аппроксимирующиеся билинейными/мультилинейными кривыми;

- в случаях с неравномерно нагретыми телами указываются также свойства для различных температур и обязательно учитывается коэффициент теплового расширения;
- динамические задачи требуют предварительно определять плотность и иногда коэффициент вязкого демпфирования;
- стационарные задачи на теплопроводность невозможно решить без коэффициента теплопроводности;
- нестационарная теплопроводность предусматривает необходимость указания плотности материалов и теплоемкости;
- нелинейные задачи на теплопроводность невозможны без указания физических свойств, определяемых как температурные функции.

Поэтому любой объект определяется конечным числом параметров, не зависящих друг от друга и расположенных в узлах модели. Также эти параметры называют степенями свободы. В тех задачах, которые будут рассмотрены в рамках этой работы, степенями свободы будут считаться перемещения узлов (в том числе угловые). В задачах на теплопроводность в качестве степеней свободы будут указываться значения температуры в узловых точках.

Координаты узлов, перемещения узлов и произвольных точек элементов, силы и другие объекты могут определяться в различных системах отсчёта (системах координат). В алгоритме МКЭ используются общая (глобальная) система координат, привязанная ко всей конечно-элементной модели (см. рис. 1), и местные (локальные) системы координат, связанные с конкретными конечными элементами, в силу чего их называют элементными системами отсчёта. Переход от одной системы отсчёта к другой производится с помощью матриц преобразования.

Чтобы перейти от одной системы к другой, необходимо использовать особые матрицы преобразования.

В задачах на деформирование количество степеней свободы напрямую зависит от используемой системы координат и вида задачи. Рис. 1 иллюстрирует узел i , обладающий тремя координатами (x, y, z) – это три степени свободы,

которые вместе образуют узловой вектор. Его удобно записать в следующем виде (общая система координат):

$$U_i = \{U_i\} = \begin{Bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \\ u_{iz} \end{Bmatrix}. \quad (1)$$

При условии, что узел i обладает n_i , степенями свободы, а конечный элемент содержит n_e узлов, то количество степеней свободы одного КЭ будет $n_e \cdot n_i$. Тогда количество степеней свободы во всей модели, содержащей n однотипных узлов будет $N = n \cdot n_i$. Совокупность степеней свободы во всей модели образует общий (глобальный) вектор степеней свободы (то есть узловых перемещений модели), в котором нумерация степеней свободы может быть общей (глобальной) или по номерам узлов с добавлением индекса узловой степени свободы:

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ M \\ u_q \\ M \\ u_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_1 \\ \dots \\ U_i \\ \dots \\ U_n \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

где $\{U_i\}$ - подматрица, составленная из всех n , компонентов перемещения узла i . В частности, для трёхмерной задачи, которая использует общую декартовую систему координат x, y, z , эта подматрица является вектором перемещений узла. Переход от узловой нумерации к общей очевиден.

Для тепловой задачи один узел с глобальным номером i имеет одну степень свободы - T_i . В таком случае общий (глобальный) вектор степеней свободы записывается иначе:

$$T = \begin{Bmatrix} T_1 \\ M \\ T_n \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

2.3 Достоинства и недостатки МКЭ

Главным преимуществом применения метода конечных элементов является возможность моделировать тело со сложной геометрией, сохраняя при этом высокую точность и детализацию. И все благодаря применению расчетных сеток.

А среди очевидных минусов метода – необходимость в высокопроизводительном ЭВМ. Поскольку производимые вычисления требуют высокой точности приближенного решения.

3 ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПАКЕТЕ ANSYS

3.1 Введение в пакет ANSYS

ANSYS – это программа, которая позволяет использовать метод конечных элементов (МКЭ) для решения нестационарных, линейных, нелинейных задач физики, механики, теплопередачи и электродинамики. Также ANSYS используется для вычислений задач деформирования (метод перемещений).

Программа предлагает производить расчеты в пакетном (Batch) или интерактивном (Interactive) виде:

1. Пакетный режим предполагает, что пользователь сначала напишет программу посредством встроенного языка APDL и соответствующих команд. Впоследствии написанная программа в виде текстового файла считывается ANSYS и происходит ее выполнение. Этот формат удобно использовать для сложных вычислений, где используются цикл, переход, структура «если – то» и проч.

2. Интерактивный режим базируется на использовании графического интерфейса. Он предусматривает командное меню, где вводятся команды, и окна, где высвечивается результат. Интерактивный формат является основным способом использования ANSYS – даже в пакетном режиме используются командные файлы.

ANSYS решает краевую задачу в 3 последовательных логических этапа:

1. Препроцессинг – формируется основа КЭМ (конечно-элементная модель):

- определяется тип задачи;
- определяется тип КЭ;
- определяется материал и его свойства;
- моделируется «твердая» модель объекта;
- модель делится на КЭ;
- при необходимости, определяются контактные пары.

2. Процессинг – на модель накладываются физические условия, после чего происходит фактическое решение задачи:

- определяются граничные условия;
- определяется тип анализа;
- решаются уравнения, полученные методом конечных элементов;
- формируется файл с результатами.

3. Постпроцессинг – анализируются результаты (создаются картинки, графики, анимации, таблицы и проч.

В процессе решения задачи в ANSYS формируется полная база данных со сведениями об объекте. Данные можно записать в бинарном виде для последующего анализа. Если возникают вопросы, то можно обратиться к модулю Help. Также в программе можно использовать новую модульную систему Workbench, которая более адаптивна к некоторым пакетам CAD и CAE, а также помогает легче настраивать контактные пары и самостоятельно генерирует отчеты. Полный переход на Workbench пока не возможен, но его постоянно расширяемые возможности особенно удобны для начинающих пользователей.

3.2 Работа в Workbench

Главным объектом в ANSYS Workbench является проект, в котором создаются геометрические, физические модели и модели КЭ и производятся вычисления результатов. Также проект может делиться на разные блоки, которые проводят разные виды анализа. Каждый блок состоит из 18 поэтапных частей, которые формируются в 3 главных шага:

1. Создание модели для численного решения (препроцессинг).
2. Задание необходимых параметров и непосредственно решение заданной точности.
3. Анализ полученного результата (постпроцессинг).

Инженерный анализ практически никогда не бывает линейным. Чаще всего требуется возвращаться к предыдущим этапам, корректировать модели, менять сетки и настройки. Поэтому так важно иметь удобные инструменты для выполнения этих действий. Именно этот фактор позволяет относить платформу

Workbench эффективным и удобным для решения задач с использованием разных решателей.

4 ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТРЕЛЫ ТУА

4.1 Нагрузки и закрепления стрелы ТУА

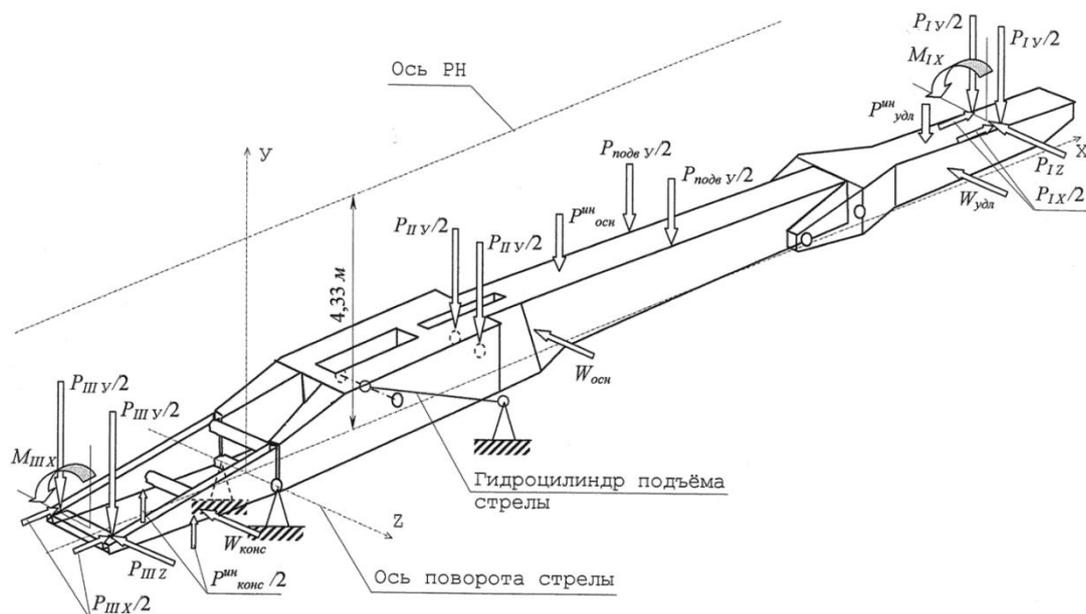


Рисунок 2 – Нагрузки и закрепления стрелы ТУА

Предположим, что на стрелу транспортно-установочного агрегата действуют:

- весовая нагрузка;
- ветровая нагрузка из-за боковых порывов;
- инерция.

На Рис. 2 обозначены нагрузки и моменты сил:

- в месте присоединения нижней опоры к верху продольных балок стрелы с координатами $X_{III} = -5,44$ м и $Y_{III} = 0,33$ м со стороны РН и самой опоры:

$$-P_{IIIY} = P_{IIIY}^P + P_{IIIY}^{ин} + G_4 + P_{4Y}^{ин} = 14408 - 457 + 1080 - 37 = 15000 \text{ кгс}, \quad (4)$$

$$-P_{III X} = P_{III X}^{ин} = 159 \text{ кгс}, \quad (5)$$

$$-P_{III Z} = P_{III Z}^W = 1139 \text{ кгс}, \quad (6)$$

$$-M_{III X} = P_{III Z}^W \cdot (4,33 - Y_{III}) = 1139 \cdot (4,33 - 0,3) = 4590 \text{ кгс} \cdot \text{м}, \quad (7)$$

где $P_{III Y}^P = 14408$ кгс, $P_{III Y}^{ин} = -457$ кгс и $P_{III X}^{ин} = -159$ кгс - весовая и инерционная нагрузки со стороны РН;

$G_4 = 1080$ кгс и $P_{4 Y}^{ин} = -37$ кгс - весовая и инерционная нагрузки со стороны нижней опоры;

$P_{III Z}^W = 1139$ кгс - ветровая нагрузка со стороны РН;

$M_{III X}$ - момент относительно оси X от ветровой нагрузки со стороны РН;

- в месте присоединения средней опоры ко внутренним бокам продольных балок стрелы с координатами $X_{III} = 10,8$ м и $Y_{III} = 0,8$ м со стороны РН и самой опоры:

$$-P_{II Y} = P_{II Y}^P + P_{II Y}^{ин} + G_8 + P_{8 Y}^{ин} = 5900 + 149 + 1850 + 37 = 7936 \text{ кгс}, \quad (8)$$

где $P_{II Y}^P = 5900$ кгс и $P_{II Y}^{ин} = 149$ кгс - весовая и инерционная нагрузки со стороны РН, воспринимаемые средней опорой соответственно настройке её противовеса;

$G_8 = 1850$ кгс и $P_{8 Y}^{ин} = 37$ кгс - весовая и инерционная нагрузки со стороны средней опоры;

- в месте присоединения кронштейнов подвески к верхним углам центральной балки стрелы с координатами $X_{подв} = 16,0$ м, $Y_{подв} = 1,6$ м со стороны РН и самой опоры:

$$-P_{подв Y} = G_9 + P_{9 Y}^{ин} + G_{11} = 1085 + 22 + 265 = 1377 \text{ кгс}, \quad (9)$$

где $G_9=1085$ кгс и $P_{9Y}^{ин}=-37$ кгс - весовая и инерционная нагрузки со стороны кронштейнов подвески;

$G_{11}=265$ кгс- весовая со стороны тяг подвески;

- в месте присоединения на места крепления верхней опоры к верху балки удлинителя стрелы с координатами $X_I=25,92$ м и $Y_I=1,6$ м со стороны РН и самой опоры:

$$-P_{IY} = P_{IY}^P + P_{IY}^{ин} + G_{10} + P_{10Y}^{ин} = 18892 + 1352 + 4000 + 286 = 24530 \text{ кгс}; \quad (10)$$

$$-P_{IX} = P_{IX}^{ин} = 210 \text{ кгс}, \quad (11)$$

$$-P_{IZ} = P_{IZ}^W = 1050 \text{ кгс}, \quad (12)$$

$$-M_{IX} = P_{IZ}^W \cdot (4,36 - Y_I) = 1050 - (4,33 - 1,6) = 2866,5 \text{ кгс} \cdot \text{м}, \quad (13)$$

где $P_{IY}^P=18892$ кгс, $P_{IY}^{ин}=1352$ кгс и $P_{IX}^{ин}=210$ кгс - весовая и инерционная нагрузки со стороны РН;

$G_{10}=4000$ кгс и $P_{10Y}^{ин}=286$ кгс - весовая и инерционная нагрузки со стороны верхней опоры;

$P_{IZ}^W=1050$ кгс - ветровая нагрузка со стороны РН;

M_{IX} - момент относительно оси X от ветровой нагрузки со стороны РН;

- ветровые нагрузки на элементы металлоконструкции стрелы с координатами центров их приложения:

$W_{конс} = 104$ кгс, $X=-2,5$ м, $Y=0,35$ м - на консоль;

$W_{осн} = 341$ кгс, $X=10,3$ м, $Y=0,80$ м - на основание;

$W_{удл} = 156$ кгс, $X=25,9$ м, $Y=1,04$ м - на удлинитель;

- силы инерции, действующие на части конструкции стрелы с координатами центров их приложения:

$P_{\text{конс}}^{\text{ин}} = 12 \text{ кгс}$, $X = -1,92 \text{ м}$, $Y = 0,35 \text{ м}$ - на консоль;

$P_{\text{осн}}^{\text{ин}} = 495 \text{ кгс}$, $X = 8,7 \text{ м}$, $Y = 0,80 \text{ м}$ - на основание;

$P_{\text{удл}}^{\text{ин}} = 456 \text{ кгс}$, $X = 28,0 \text{ м}$, $Y = 1,04 \text{ м}$ - на удлинитель.

Все нагрузки, величины которых меньше 20 кгс, не учитываются в расчетах, т. к. обладают относительно малыми значениями. Вес самого ТУА учитывается благодаря назначению в модели КЭ векторов ускорения свободного падения.

4.2 Результаты анализа стрелы ТУА

1. Сначала необходимо создать геометрию: убрать щели, наложения, элементы, которые можно не учитывать (маленькие отверстия и т. д.).
2. Далее дорисовать две оси (Рис. 3).

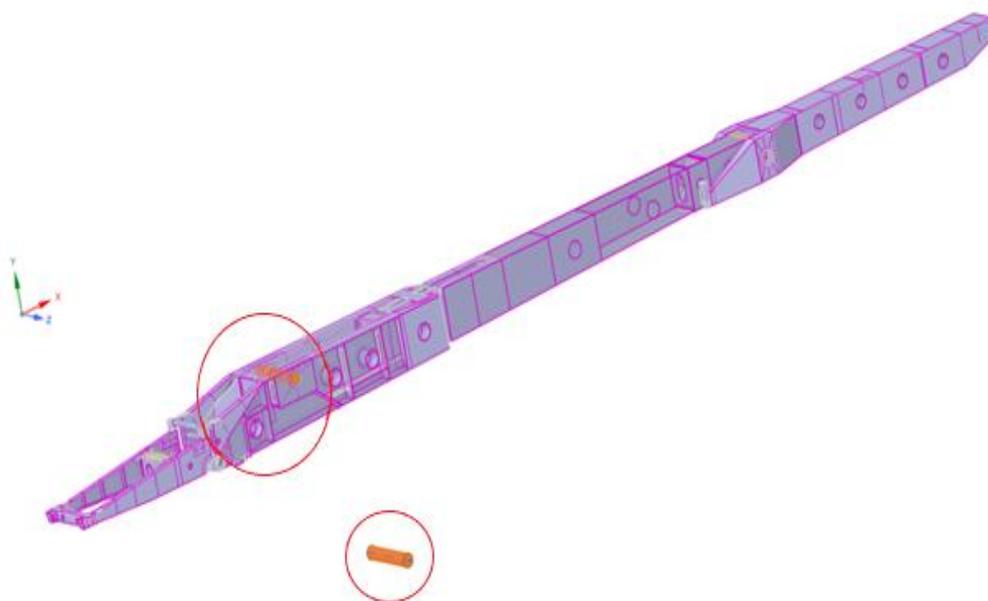


Рисунок 3 – Дорисовка осей

3. После объединить с помощью команды ShareTopology узлы сборки (Рис. 4). Эта команда не объединит их в 1 объект, но поможет рассмотреть объект из множества компонентов, как единый.

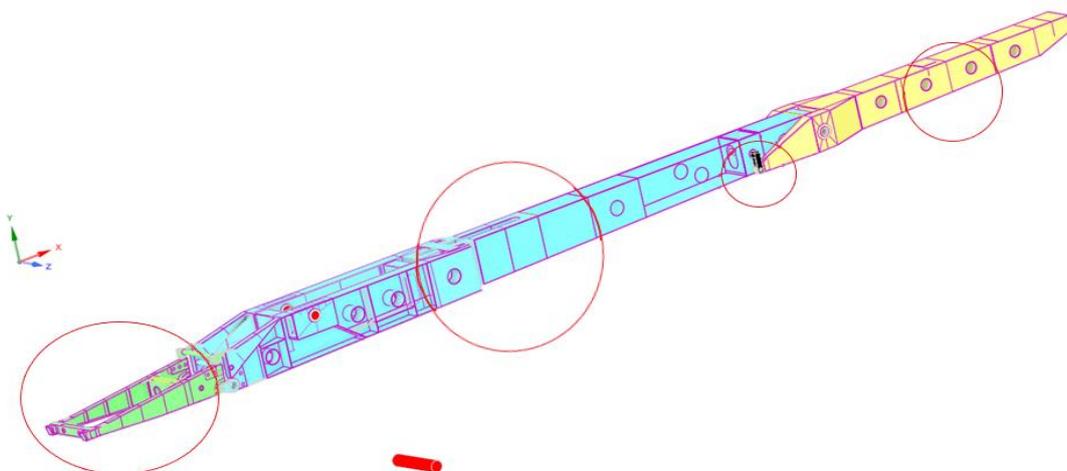


Рисунок 4 – Стрела в сборке

4. Выполнить расчет в AnsysWorkBench, выбрав систему TransientStructural и с помощью контекстного меню вызвав файл с построенной геометрией (Рис. 5).

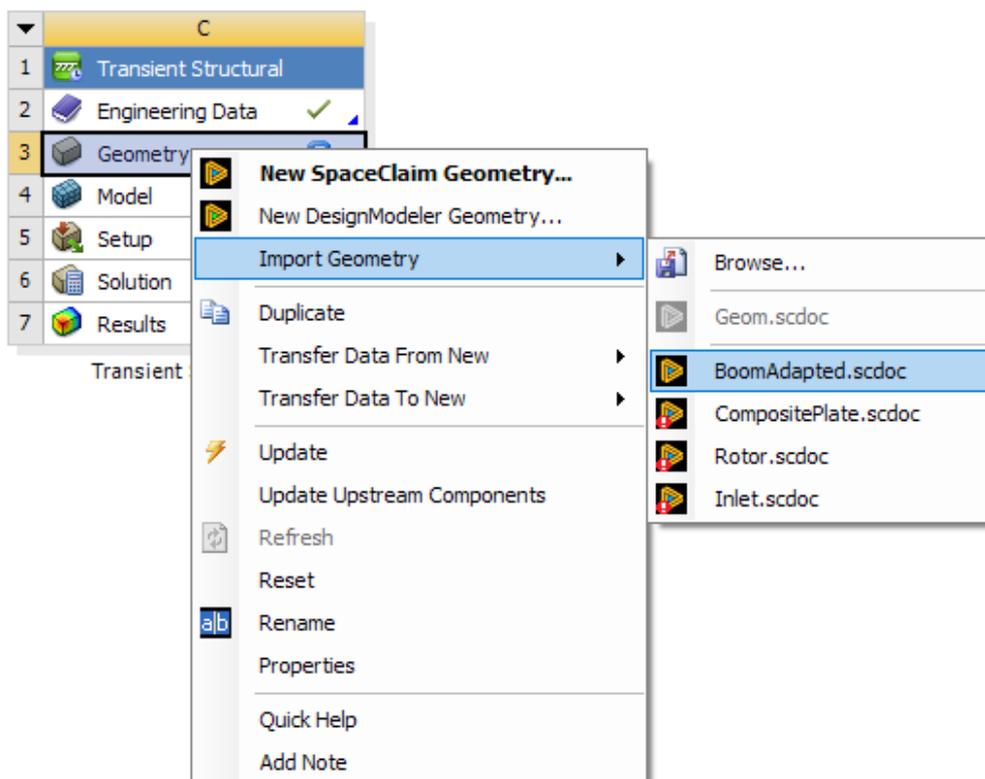


Рисунок 5- Выбор геометрии стрелы

5. Далее необходимо вызвать строку Model и присвоить всем элементам материал (Рис. 6).

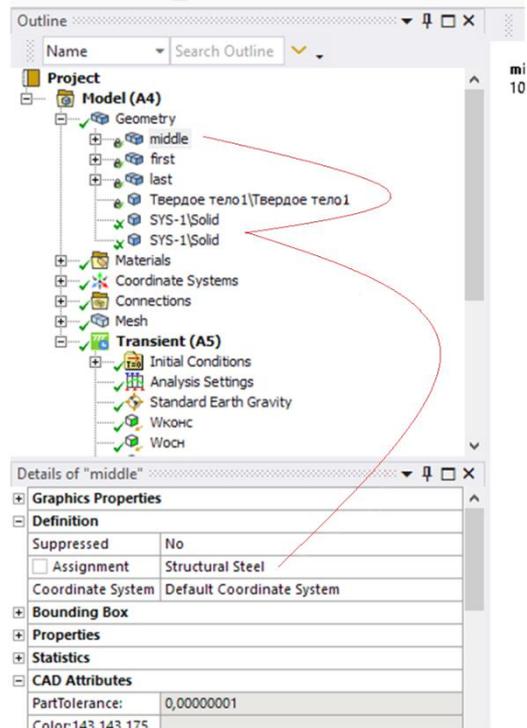


Рисунок 6 - Выбор материала

6. Потом нужно задать глобальные настройки сетки (Рис. 7).

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	50, mm
Sizing	
<input type="checkbox"/> Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,85)
<input type="checkbox"/> Max Size	50, mm
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	0,2 mm
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No
Size Formulation...	Program Controlled
Bounding Box Di...	39619 mm
Average Surface ...	1,5577e+005 mm ²
Minimum Edge L...	0,48769 mm
Enable Size Field...	No
Quality	
Inflation	
Advanced	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	439363
<input type="checkbox"/> Elements	1883831

Рисунок 7- Настройка сетки

7. Установить метод разбивки тетраэдрами.

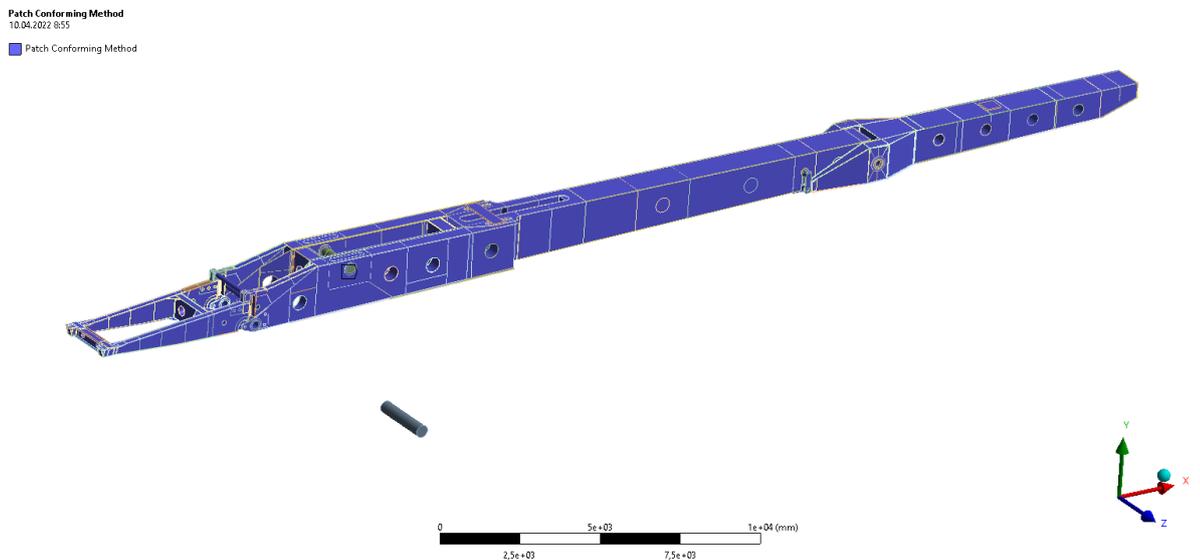


Рисунок 8 - Общий вид стрелы ТУА с сеткой

8. После необходимо задать тип связи «шарнир»: между осями «Translational», во всех остальных – «revolute».

Revolute - Твёрдое тело To SYS-1\Solid
 Items: 10 of 26 indicated
 10.04.2022 8:56

- A Revolute - Твёрдое тело\Твёрдое тело1 To Твёрдое тело
- B Revolute - Твёрдое тело\Твёрдое тело1 To Твёрдое тело
- C Revolute - Твёрдое тело\Твёрдое тело1 To Твёрдое тело1
- D Revolute - Твёрдое тело\Твёрдое тело1 To Твёрдое тело1
- E Revolute - Твёрдое тело To Твёрдое тело
- F Revolute - Твёрдое тело To Твёрдое тело
- G Revolute - Multiple To Твёрдое тело1
- H Revolute - Ground To Твёрдое тело
- I Revolute - Ground To Твёрдое тело
- J Translational - SYS-1\Solid To SYS-1\Solid

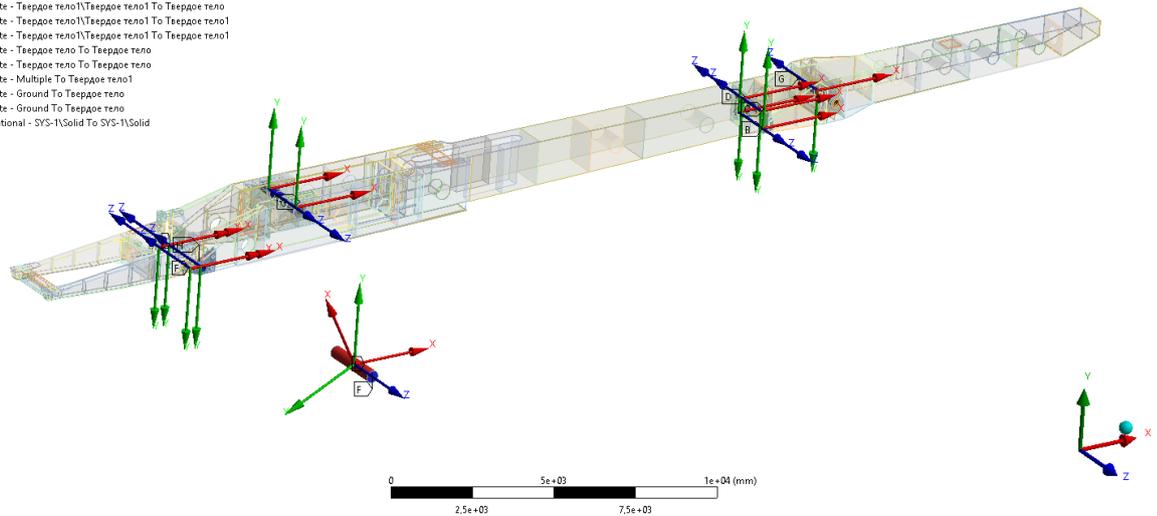


Рисунок 9 - Настройка крепления

9. Задать граничные параметры.

A: Transient Structural
 Transient
 Time: 50, s
 Items: 10 of 13 indicated
 10.04.2022 9:01

- A Joint - Displacement: 4500, mm
- B Wконс: 1040, N
- C Wосн: 3410, N
- D Wосн 2: 1560, N
- E Pn: 3,978e+005 N
- F Pноса: 13770 N
- G Pi: 2,4531e+005 N
- H Piii: 16223 N
- I Miii: 2,5245e+007 N*mm
- J Mi: 2,866e+007 N*mm

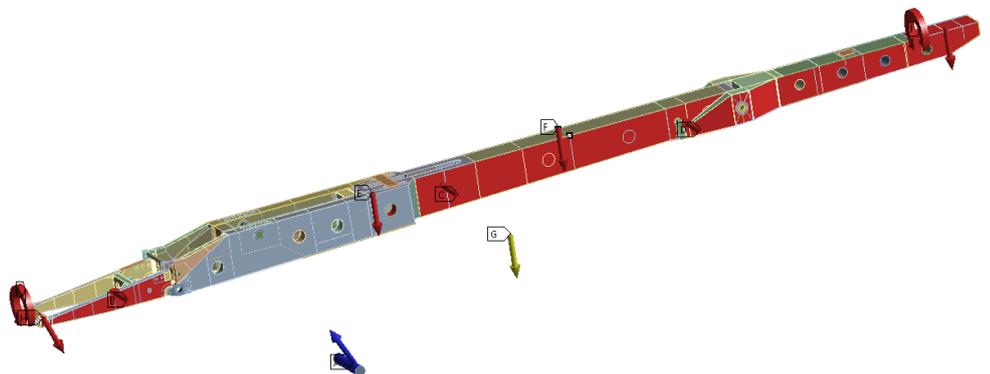


Рисунок 10 - Настройка граничных условий

10. Задать перемещения стрелы в шарнире TranslationalJoint, учитывая ускорение из-за разгона или торможения (Рис. 11).

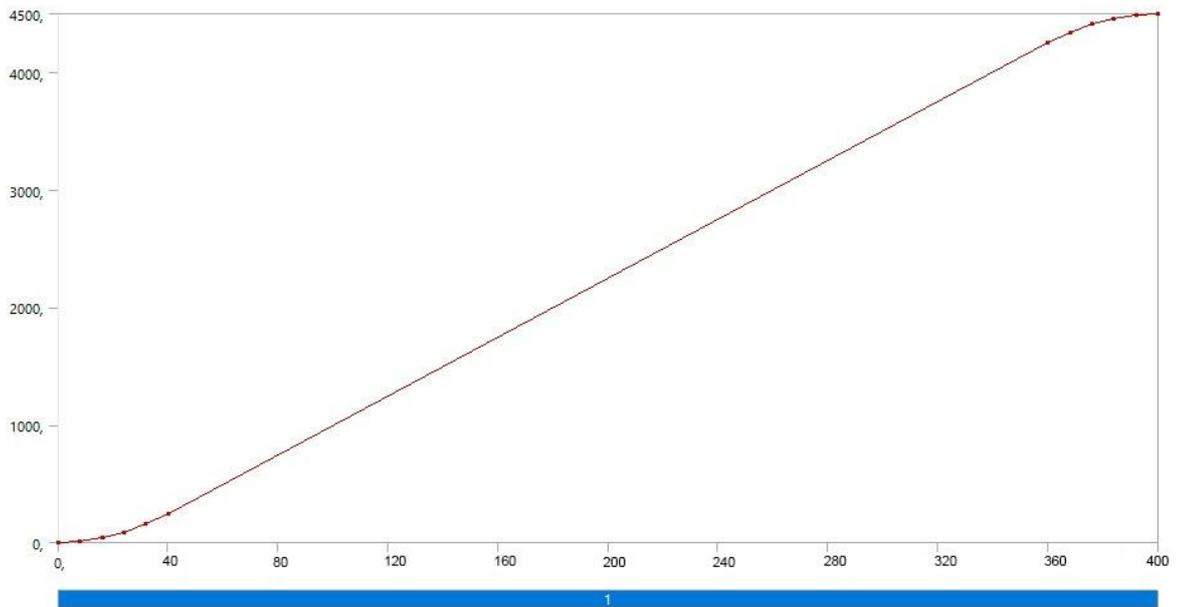


Рисунок 11 - Настройка перемещения стрелы

После настройки всех параметров ANSYS построит график, где будет наглядно представлены зависимости скорость-время (Рис. 12) и ускорение-время (Рис. 13).

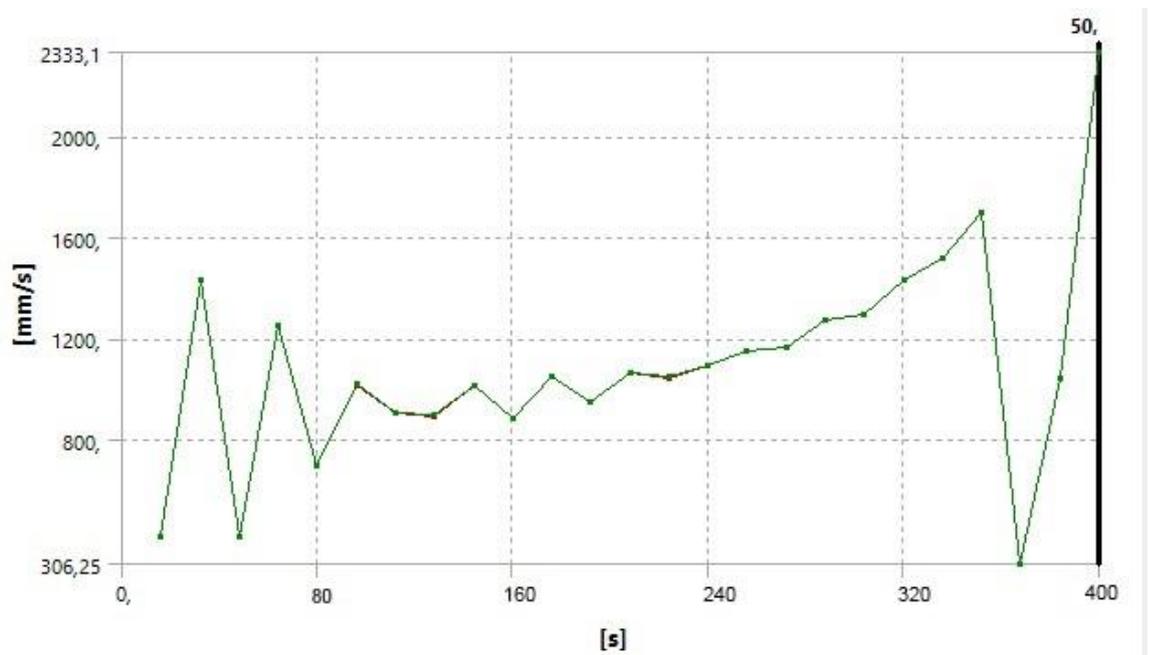


Рисунок 12- Графическая зависимость скорости от времени

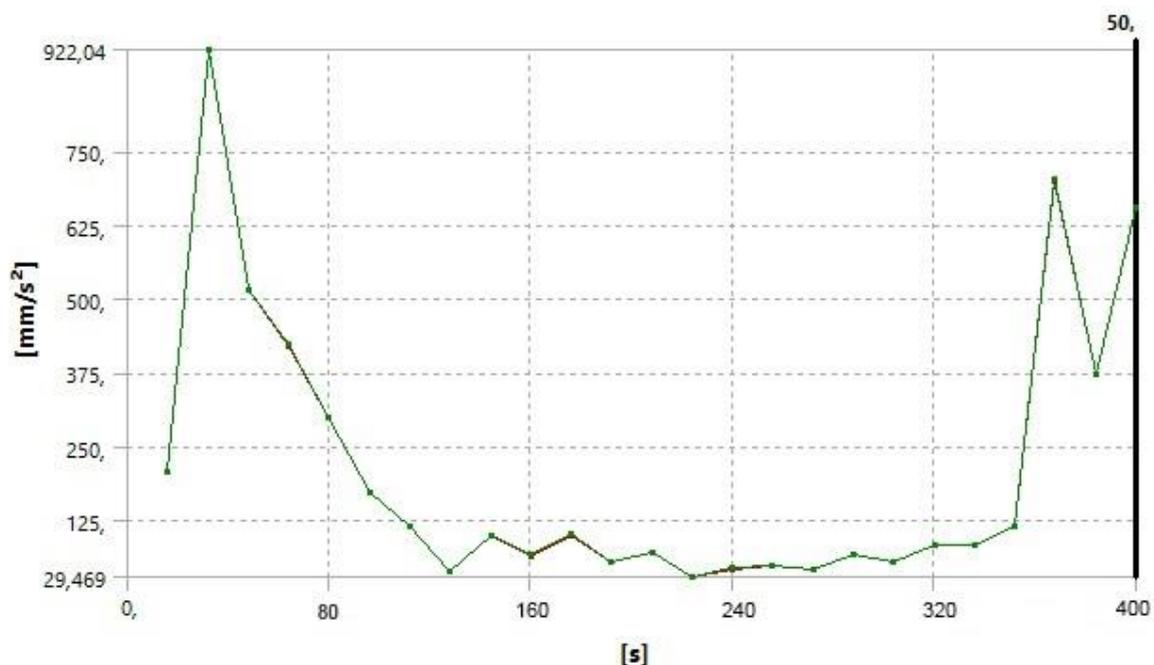


Рисунок 13 -Графическая зависимость ускорения от времени

Исходя из данных графиков следует вывод, что динамический анализ проведен верно, так как возникает скорость и ускорение стрелы ТУА.

10. В результате по углу наклона и перемещение определяем, что по мере подъема от 0 до 90 градусов максимальное значение деформации 45,866 мм и минимальное 0,0594 мм.

Для оценки характеристики общей деформации при подъеме стрелы было проведено 10 анализов под различными углами составляющие: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 градусов.

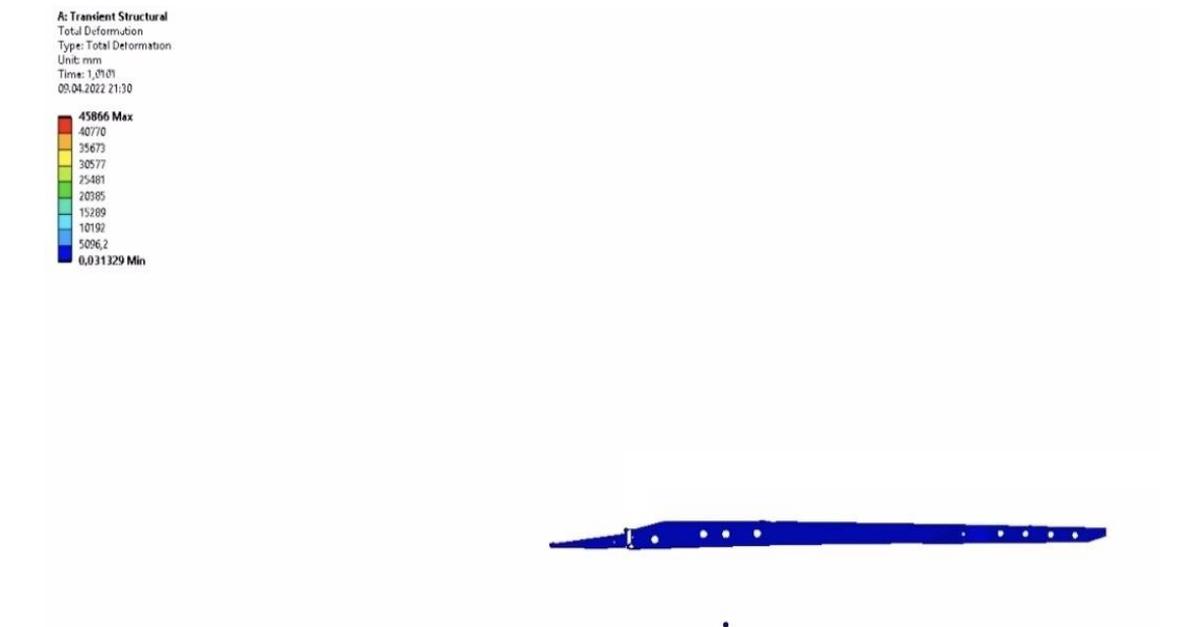


Рисунок 14 – Деформация стрелы ТУА при 0 градусов.



Рисунок 15 – Деформация стрелы ТУА при 10 градусов.

A: Transient Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 13,121
09.04.2022 21:30

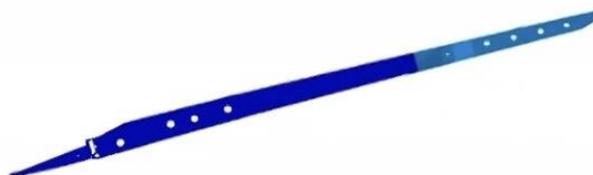
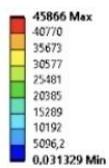


Рисунок 16 -Деформация стрелы ТУА при 20 градусов.

A: Transient Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 15,657
09.04.2022 21:30

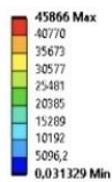


Рисунок 17 -Деформация стрелы ТУА при 30 градусов.

A: Transient Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 21,712
09.04.2022 21:30

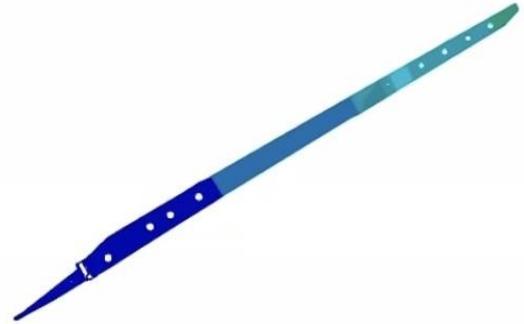
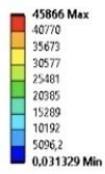


Рисунок 18 -Деформация стрелы ТУА при 40 градусов.

A: Transient Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 30,103
09.04.2022 21:30

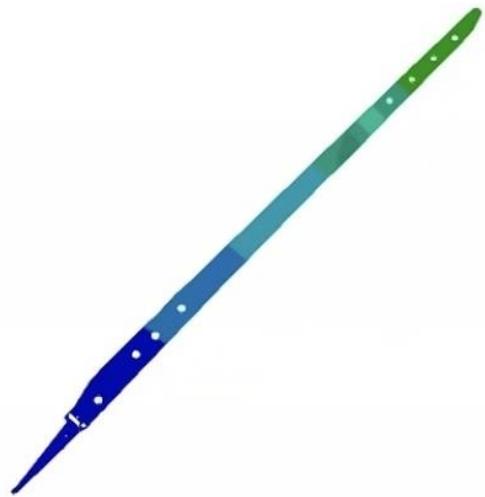
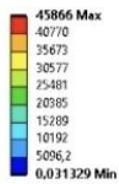


Рисунок 19 -Деформация стрелы ТУА при 50 градусов.

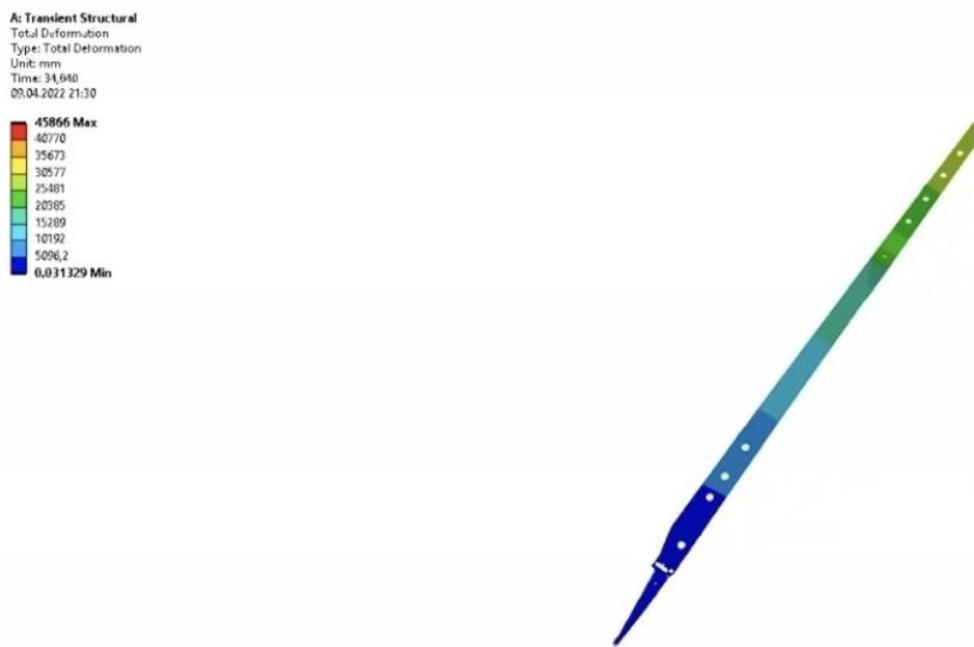


Рисунок 20 -Деформация стрелы ТУА при 60 градусов.

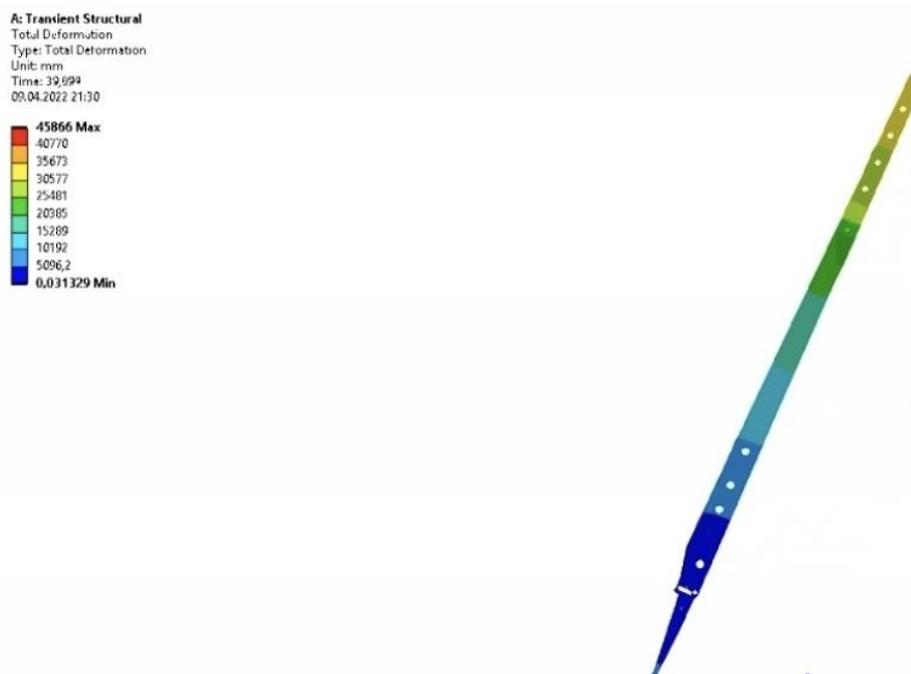


Рисунок 21 -Деформация стрелы ТУА при 70 градусов.

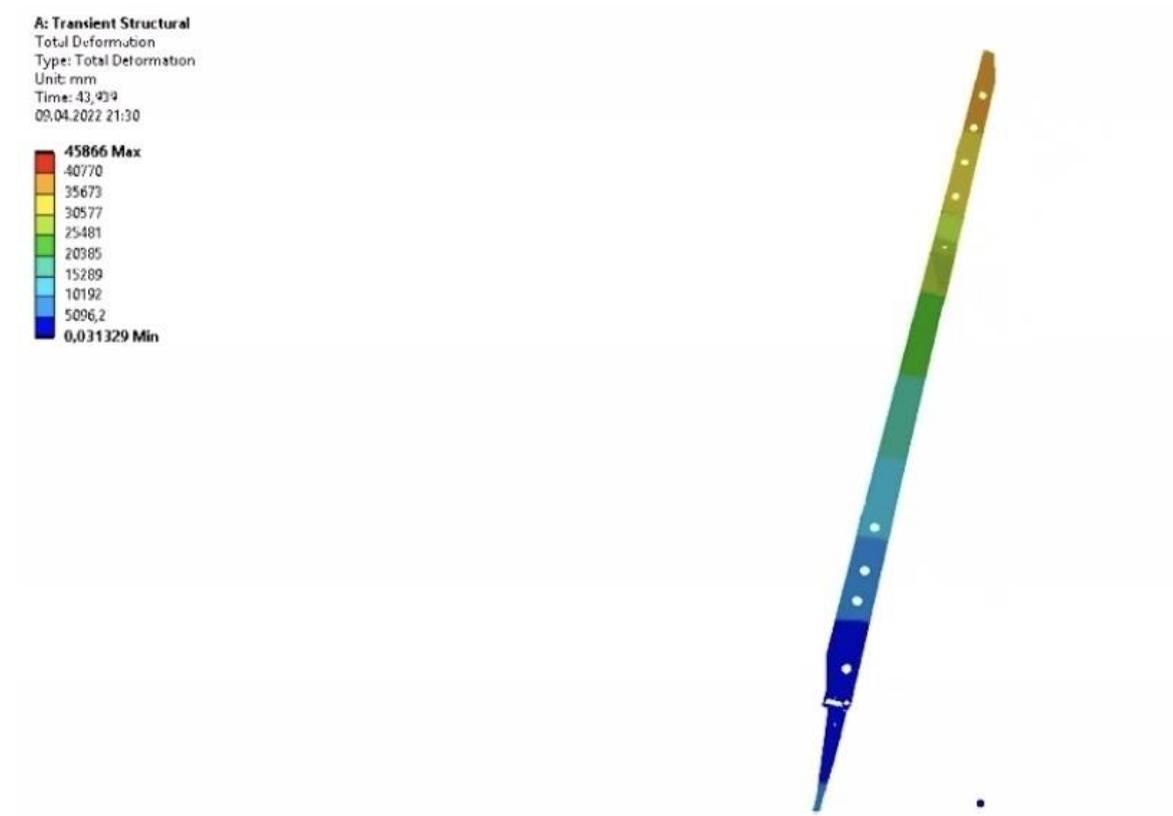


Рисунок 22 -Деформация стрелы ТУА при 80 градусов.

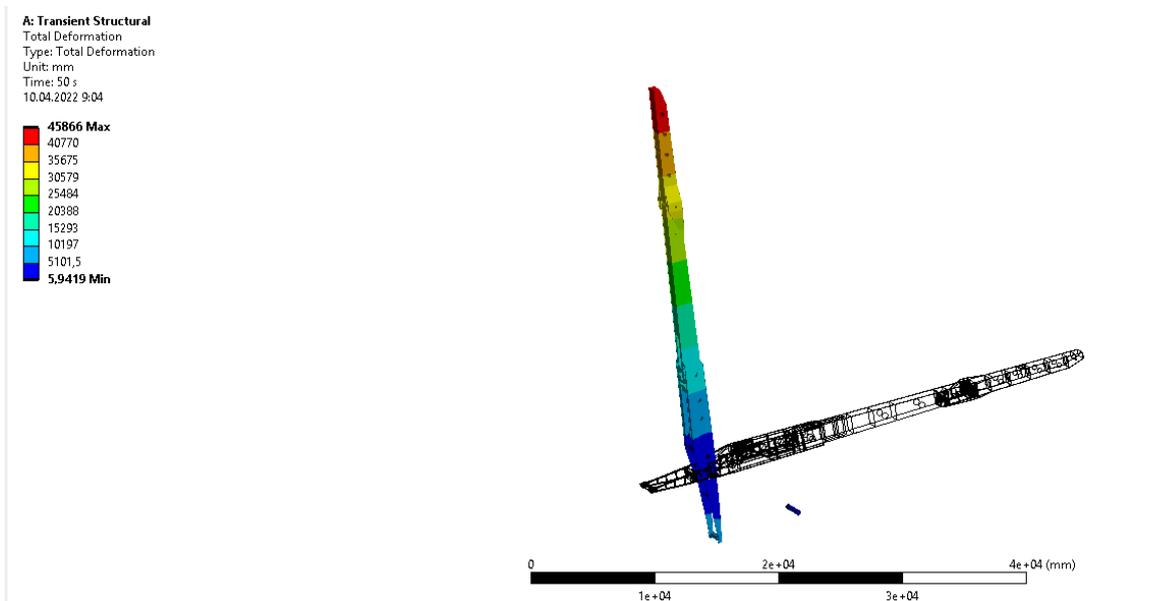


Рисунок 23 - Общее деформация стрелы ТУА 90 килограмм .

Исходя из рисунков 14-23 можно сделать вывод, что в процессе подъема ТУА возрастает общая деформация. Самое нагруженное место является удлинитель.

Из рисунка 24 можно заметить максимально напряженные места конструкции и сделать вывод, что в местах соединения удлинителя и консоли значение будет равно 243,98 МПа. Места, в которых возникает максимальная деформация, представлены на рисунке 15.

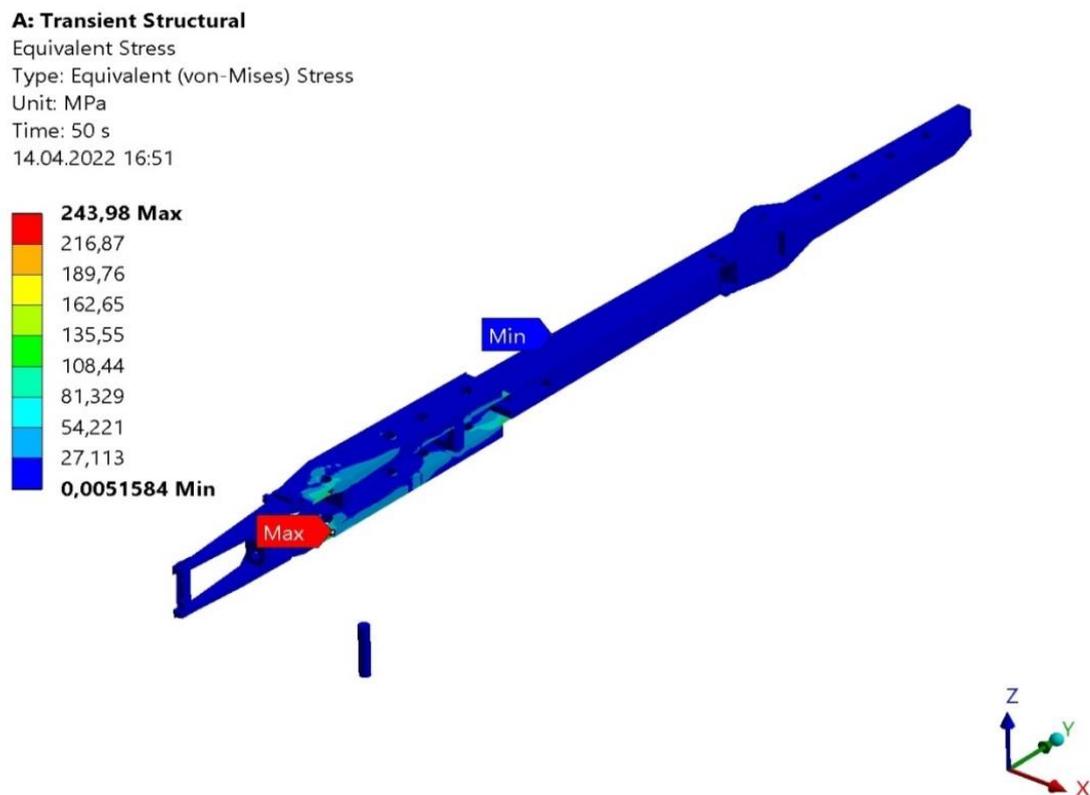


Рисунок 24 - Эквивалентное напряжение

A: Transient Structural

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

Time: 50 s

14.04.2022 16:50

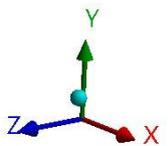
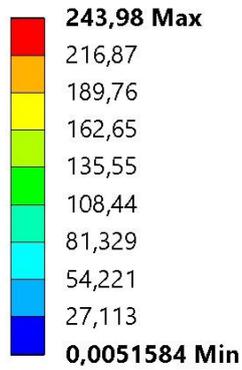


Рисунок 25- Максимальная эквивалентное напряжение

Максимальное эквивалентное напряжение равняется 243,98 Мпа , а самое слабое место является место соединения консоли и удлинителя .

5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НК

5.1 Расчет НДС акустическим методом НК

Для того что бы определить НДС в точке контроля применяют метод акустоупругости. Схема прозвучивания применяется согласно эхо-методу УЗК при помощи ПЭП. Соответствующие уравнения связи скорости и времени распространения упругих объемных волн различной поляризации с действующими напряжениями в рамках матричной теории акустоупругости при отсутствии внешних тепловых и электромагнитных воздействий имеют обычный для линеаризованных соотношений вид:

$$\delta V_{ik} = \beta_{ikln}(\sigma_{in} - \delta_{in}), \quad (14)$$

$$\sigma t_{ik} = \alpha_{ikln}(\sigma_{in} - \delta_{in}), \quad (15)$$

где σ_{in}, δ_{in} - тензор напряжений в момент измерения и тензор начальных напряжений соответственно;

$\delta V_{ik}, \sigma t_{ik}$ - относительные изменения скорости и времени распространения упругих волн:

$$\delta V_{ik} = \frac{V_{ik} - V_{ik}^0}{V_{ik}^0}, \quad (16)$$

$$\delta t_{ik} = \frac{t_{ik} - t_{ik}^0}{t_{ik}^0}, \quad (17)$$

где V_{ik} и t_{ik} соответствуют напряжениям σ_{in} , V_{ik}^0 и t_{ik}^0 - начальным напряжениям σ_{in}^0 .

При отсутствие начальных напряжений уравнение (14), (15) будут иметь вид:

$$\delta V_{ik} = \beta_{ikln} \sigma_{in}, \quad (18)$$

$$\sigma t_{ik} = \alpha_{ikln} \sigma_{in}. \quad (19)$$

Для того чтобы рассчитать σ_1 и σ_2 потребуется формулы:

$$\sigma_1 = k_1 \delta d_1 + k_2 \delta d_2 = -2,43\sigma \cdot 3,45 + 2,57\sigma \cdot -0,71 = 118,83 \text{ МПа} \quad (20)$$

$$\sigma_2 = k_3 \delta d_1 + k_4 \delta d_2 = 2,57 \cdot 3,45 - 2,43 \cdot (-0,71) = 124,77 \text{ МПа}. \quad (21)$$

Для того что бы вычислить НДС необходимо вычислить:

$$\delta d_1 = \frac{d_1 - d_1^0}{d_1^0} = \frac{1,47 - 0,33}{0,33} = 3,45, \quad (22)$$

$$d_1 = \frac{t_1}{t_3} = \frac{27,3 \cdot 10^{-9}}{18,6 \cdot 10^{-9}} = 1,47, \quad (23)$$

$$d_1^0 = \frac{t_1^0}{t_3^0} = \frac{5,1 \cdot 10^{-9}}{15,31 \cdot 10^{-9}} = 0,33, \quad (24)$$

$$\delta d_2 = \frac{d_2 - d_2^0}{d_2^0} = \frac{0,67 - 2,33}{2,33} = -0,71, \quad (25)$$

$$d_2 = \frac{t_2}{t_3} = \frac{10,2 \cdot 10^{-9}}{15,31 \cdot 10^{-9}} = 0,67, \quad (26)$$

$$d_2^0 = \frac{t_2^0}{t_3^0} = \frac{35,7 \cdot 10^{-9}}{15,31 \cdot 10^{-9}} = 2,33. \quad (27)$$

Упругоакустические коэффициенты рассчитываются по формулам:

$$k_1 = \frac{a_4}{a_1 a_4 - a_2 a_3}, \quad (28)$$

$$k_2 = \frac{a_2}{a_1 a_4 - a_2 a_3}, \quad (29)$$

$$k_3 = \frac{a_3}{a_1 a_4 - a_2 a_3}, \quad (30)$$

$$k_4 = \frac{a_1}{a_1 a_4 - a_2 a_3}. \quad (31)$$

Параметры a_1, a_2, a_3, a_4 можно выразить через акустоупругий коэффициент β_{ikln} :

$$a_1 = \beta_{3311} - \beta_{3111} = \beta_{3322} - \beta_{3111}, \quad (32)$$

$$a_2 = \beta_{3311} - \beta_{3122} = \beta_{3322} - \beta_{3122}, \quad (33)$$

$$a_3 = \beta_{3311} - \beta_{3211} = \beta_{3322} - \beta_{3211}, \quad (34)$$

$$a_4 = \beta_{3311} - \beta_{3222} = \beta_{3322} - \beta_{3222}. \quad (35)$$

Так как материал является изотропным, то принимаются следующие условия:

$$a_1 = a_4 = 38,45 \frac{1}{\text{МПа}}, \quad (36)$$

$$a_2 = a_3 = 40,77 \frac{1}{\text{МПа}}. \quad (37)$$

Тензометрические коэффициенты для для изотропного материала равны:

$$k_1 = k_4 = \frac{a_1}{a_1^2 - a_2^2} = \frac{3,3}{10,89 - 12,25} = -28,31 \text{ МПа}, \quad (38)$$

$$k_2 = k_3 = -\frac{a_2}{a_1^2 - a_2^2} = \frac{3,5}{10,89 - 12,25} = 29,94 \text{ МПа.} \quad (39)$$

Для определения акустоупругих коэффициентов необходимо провести регрессионную обработку зависимостей:

$$a_1 = \frac{\Delta d_1}{d_1^0}(\sigma) = \frac{1,1}{0,33} = 38,45 \frac{1}{\text{МПа}}, \quad (40)$$

$$a_2 = \frac{\Delta d_2}{d_2^0}(\sigma) = \frac{2,33}{0,66} = 40,77 \frac{1}{\text{МПа}}. \quad (41)$$

Для нахождения регрессивных коэффициентов из формулы (40) необходимо воспользоваться зависимостью:

$$\Delta d_1 = \frac{t_1}{t_3} - \frac{t_1^0}{t_3^0} = \frac{27,3 \cdot 10^{-9}}{18,6 \cdot 10^{-9}} - \frac{5,10 \cdot 10^{-9}}{15,31 \cdot 10^{-9}} = 1,1, \quad (42)$$

$$\Delta d_2 = \frac{t_2}{t_3} - \frac{t_2^0}{t_3^0} = \frac{35,7 \cdot 10^{-9}}{18,6 \cdot 10^{-9}} - \frac{10,20 \cdot 10^{-9}}{15,31 \cdot 10^{-9}} = 1,3, \quad (43)$$

Где t_1^0 , t_2^0 , t_3^0 - задержка в материале, которая находится по формуле:

$$t_1^0 = \frac{\Delta V_{\text{ВЛ}}}{S^2} = 5,10 \text{ нс}, \quad (44)$$

$$t_2^0 = \frac{2 \cdot \Delta V_{\text{ВЛ}}}{S^2} = 10,20 \text{ нс}, \quad (45)$$

$$t_3^0 = \frac{3 \cdot \Delta V_{\text{ВЛ}}}{S^2} = 15,31 \text{ нс}, \quad (46)$$

Где $\Delta V_{\text{ВЛ}} = 2700 \text{ м/с}$ – разность между скоростью ультразвука в продольной и поперечной волне, а $S^2 = 529$ – толщина стенки изменяемого объекта

5.2 Составление протокола измерений

Таблица 3 – Протокол измерений

Наименование объекта контроля	Стрела ТУА		
Толщина контролируемого объекта, мм	23		
Марка материала	Сталь 10ХСНД		
Тензометрические (упругоакустические) коэффициенты, МПа			
k_1	k_2	k_3	k_4
38,45	40,77	40,77	38,45
Температура поверхности объекта контроля без напряжений T (°С)	20		
Температура поверхности объекта контроля при действии напряжений T (°С)	20		
Значения задержек для материала объекта контроля без напряжений, нс			
t_1^0	5,10		
t_2^0	10,20		
t_3^0	15,31		
Значения задержек для точки измерения напряжений материала объекта контроля, нс			
t_1	27,3		
t_2	35,7		
t_3	18,6		
Значения напряжений, МПа			
σ_1	118,83		
σ_2	124,77		

6 БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Работники, взаимодействующие с ультразвуковым оборудованием, испытывают негативные последствия только при условии превышения ультразвуковым сигналом разрешенных значений. Негативные последствия сводятся к локальным давлениям, которые образуются в тканях, и местному тепловому эффекту, прямо связанному с поглощением энергии в процессе подавления вибрации.

В отличие от газообразной и жидкой сред, которые поглощают ультразвуковые волны, твердые среды хорошо его проводят. Скелет человека, являясь твердой средой, также служит хорошим проводником ультразвука. Воздействие ультразвука на человека приводит, в первую очередь, к появлению термоэффекта, возникающего из-за преобразования поглощенной тканями волны в тепло. Если волны воздействуют продолжительное время, то это впоследствии приводит к разрушению клеток и их гибели.

6.1 Источники, классификация и характеристика ультразвука

Источниками ультразвуковых волн могут быть:

- производственное оборудование, на котором целенаправленно генерируются ультразвуковые волны (УЗВ);
- производственное оборудование, где УЗВ возникают в качестве побочного фактора.

По частоте все УЗ-устройства (ультразвуковые) можно разделить на:

- низкочастотные (11–100 кГц);
- высокочастотные (100 кГц-1000 МГц).

Распространяться ультразвуковые волны могут по воздуху или при непосредственном соприкосновении. Низкочастотные волны могут воздействовать на организм только при непосредственном соприкосновении. Поэтому они называются контактным ультразвуком.

6.2 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. Максимально допустимые значения на рабочих местах» 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

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0}, \quad (47)$$

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 3 .

Таблица 4 – Максимально 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

Нормируемыми параметрами контактного ультразвука - это пиковые значения виброскорости L или ее логарифмические уровни в децибелах в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 8, 16, 31,5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16 000, 31 500 кГц, определяемые по формуле:

$$L_v = 20 \log \frac{v}{v_0}, \quad (48)$$

где v – пиковое значение виброскорости, м/с; v_0 – опорное значение виброскорости, равное $5 \cdot 10^{-8}$ м/с.

Допустимые уровни виброскорости и ее пиковые значения на рабочих местах не должны превышать значений, приведенных в таблице 4.

Таблица 5 – Предельно допустимые уровни и пиковые значения контактного ультразвука

Среднегеометрические частоты октавных полос, кГц	Пиковые значения виброскорости, м/с	Уровни виброскорости, дБ
8 – 63	$5 \cdot 10^{-3}$	100
125 – 500	$8,9 \cdot 10^{-3}$	105
$1 \cdot 10^3 – 31,5 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	110

Допустимые уровни контактного ультразвука следует принимать на 5 дБ ниже значений, указанных в таблице 2, в тех случаях, если работники подвергаются совместному воздействию воздушного и контактного ультразвука.

6.3 Требования безопасности перед началом работы с дефектоскопом

Дефектоскописту запрещается приступать к работе без СИЗ и без установленных защитных ограждений рабочего места.

Дефектоскопист должен проверить диэлектрические перчатки, галоши, резиновые диэлектрические ковры на отсутствие механических повреждений, а диэлектрические перчатки и галоши дополнительно проверить на наличие у них штампа проверки.

Дефектоскопист должен предварительно осмотреть рабочее место, убедиться в отсутствии посторонних предметов.

Запрещается использовать дефектоскоп с разбитым или поврежденным корпусом, поврежденной изоляцией катушек и отдельных токопроводящих элементов, а также соединительных проводов и сетевых выключателей. Дефектоскопист должен быть внимательным при работе с переносным дефектоскопом, у которого изоляция токоведущих цепей повреждается чаще, чем у стационарных установок. Обо всех обнаруженных при осмотре или в процессе работы неисправностях дефектоскопа дефектоскопист должен незамедлительно со-

общить мастеру, предварительно прекратив работу с неисправным дефектоскопом.

6.4 Требования безопасности во время работы с дефектоскопом

Согласно типовой инструкции по охране труда

Во время производства работ дефектоскопист также должен следовать строгому протоколу безопасности:

- дефектоскоп следует использовать только согласно приложенной инструкции;
- запрещено прикасаться к токопроводящим и движущимся частям;
- необходимо использовать переносные светильники на 36 В;
- при малейших признаках неисправности – прекратить работу, отключить прибор и сообщить руководству;
- после проведения работ необходимо отключить прибор от сети;
- запрещено оставлять подключенный к сети дефектоскоп без присмотра.

6.5 Требования безопасности в аварийных ситуациях

При работе на дефектоскопе могут возникнуть следующие аварийные ситуации:

- поражение электрическим током;
- загорание, могущее привести к пожару или взрыву.

При возникновении аварийной ситуации дефектоскопист обязан прекратить работу, немедленно сообщить о случившемся мастеру (бригадиру) и далее выполнять его указания по предупреждению несчастных случаев или устранению возникшей аварийной ситуаций.

Находящиеся поблизости работники по сигналу обязаны немедленно явиться к месту происшествия и принять участие в оказании пострадавшему первой доврачебной помощи и устранении возникшей аварийной ситуации.

При ликвидации аварийной ситуации необходимо действовать в соответствии с планом ликвидации аварий.

При пожаре следует:

- сообщить о пожаре в пожарную охрану и руководителю работы;
- при пользовании пенными (углекислотными, порошковыми) огнетушителями струю пены (порошка, углекислоты) направлять в сторону от людей; при попадании пены на незащищенные участки тела стереть ее платком или другим материалом и смыть водным раствором соды;
- при загорании электроприборов применять только углекислотные или порошковые огнетушители. При пользовании углекислотным огнетушителем не следует брать за раструб огнетушителя и не допускается подносить раструб ближе 1 метра до электроустановки и пламени;
- внутренними пожарными кранами необходимо пользоваться расчетом из двух человек: один раскатывает рукав от крана к месту показа, второй по команде раскатывающего рукав открывает кран;
- при пользовании кошмой при тушении пламени его накрывают кошмой так, чтобы огонь из - под нее не попал на туловище человека;
- при тушении пламени песком совок, лопату и иные подобные инструменты не поднимать на уровень глаз во избежание попадания в них песка;
- тушить горячие электроприборы, находящиеся под напряжением до 1000 В, разрешается только углекислотными или порошковыми огнетушителями;
- тушить горящие предметы водой и воздушно-пенными огнетушителями можно только после указания руководителя работ или другого ответственного лица о том, что электроприбор отключен от распределительного щита или обесточен;
- тушение горящих предметов, расположенных на расстоянии более 7 м от электроустановок, находящихся под напряжением, может быть допущено без снятия напряжения. При этом необходимо следить, чтобы струя воды или пены не касалась электроустановок и электроприборов, находящихся под напряжением.

6.6 Требования безопасности по окончании работы с дефектоскопом

После завершения работ дефектоскопист должен:

- отключить прибор от сети;
- провести очистку соленоидов и всех частей, соприкасавшихся с суспензией;
- выполнить профилактику согласно техдокументации;
- убрать инструменты на места хранения;
- убрать отработанные материалы в соответствующие места хранения/утилизации;
- снять средства индивидуальной защиты и спецовку;
- вымыть загрязненную кожу/принять душ с мылом;
- принять кварцевую ванну и пройти УВЧ-терапию (опционально).

7 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

7.1 Стоимость вычислений НДС в ANSYS

Рассмотрим затраты на проведения вычислений в программе ANSYS:

- ПК минимально-необходимой мощности – ср. цена на июнь 2022 года составляет 60 тыс. руб.;
- лицензионная программа ANSYS – цена на июль 2022 составляет 1 млн 900 тыс. руб.;
- обучение (профессиональные курсы) работе в программе ANSYS – примерно 52 тыс. руб.;
- зарплата дефектоскописта – в среднем 56 тыс. руб.

Итого затраты составят: первый месяц – 2 млн 68 тыс. руб., в последующие – 56 тыс. руб.

- Зарботная плата сотрудника организации – рассчитывается по формуле:

$$\text{Зарботная плата} = \frac{\text{Оклад} \cdot k_p \cdot \text{КОД}}{\text{КРД}} - \text{НДФЛ}, \quad (49)$$

где оклад – это фиксированная выплата за полностью отработанный месяц без учета надбавок. Оклад дефектоскописта в среднем составе 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 (49) получим:

$$\text{Зарботная плата} = \frac{50000 \cdot 1,3 \cdot 22}{22} - \text{НДФЛ} = 65000 - \left(\frac{65000 \cdot 13\%}{100\%} \right) = 56550 \text{ рублей.} \quad (50)$$

Итоговая общая сумма затрат компании в первый месяц составит:
2068540 рублей, в последующие месяцы: 56550 рублей.

7.2 Затраты на оборудования для ультразвуковой дефектоскопии с использованием ПЭП

Под затратами закупки оборудования для УЗК подразумевается, затраты на покупку того или иного элемента ультразвукового контроля.

Ультразвуковой дефектоскоп А1212 MASTER – цена лето 2022 года
399,000 рублей;

Страна разработчик – Россия;

Страна производитель – Россия;

Количество -1 шт.

Малогабаритный наклонный ПЭП 2,5 МГц, угол, 65° - цена лето 2022
года 4980 рублей;

Страна разработчик – Россия;

Страна производитель – Россия;

Количество -1 шт, в качестве ЗИП возможна покупка дополнительно 1
шт.

Гель для ультразвукового контроля «АКС» - цена за 5 литров 11900
рублей;

Страна разработчик – Россия;

Страна производитель – Россия;

Количество -1 шт.

Стандартный образец номер 1 – цена 9000 рублей за штуку;

Страна разработчик – Россия;

Страна производитель – Россия;

Количество -1 шт.

Стандартный образец номер 2 – цена 7200 рублей за штуку;

Страна разработчик – Россия;

Страна производитель – Россия;

Количество -1 шт.

Стандартный образец номер 3 – цена 5900 рублей за штуку;

Страна разработчик – Россия;

Страна производитель – Россия;

Количество -1 шт.

Итоговая стоимость всей закупки / (с учетом ЗИП)-437,980 рублей
/442,960 рублей.

Помимо затрат на комплектующие, необходимо учитывать заработную плату работника, осуществляющего данный контроль.

Заработная плата сотрудника организации считается по формуле (49).

Оклад дефектоскописта в среднем составе 50000 рублей в месяц.

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

рублей. (51)

Итоговая общая сумма затрат компании в первый месяц составит: 499,510 рублей, в последующие месяцы: 56550 рублей.

7.3 Затраты на оборудования для ультразвуковой дефектоскопии с использованием ЭМАП

Ультразвуковой дефектоскоп А1270– цена лето 2022 года 447,000 рублей;

Страна разработчик – Россия;

Страна производитель – Россия;

Количество -1 шт.

ЭМАП S7394 2,5 МГц- цена лето 2022 года 65000 рублей;

Страна разработчик – Россия;

Страна производитель – Россия;

Количество -1 шт, в качестве ЗИП возможна покупка дополнительно 1 шт.

Стандартный образец номер 1 – цена 9000 рублей за штуку;

Страна разработчик – Россия;

Страна производитель – Россия;

Количество -1 шт.

Стандартный образец номер 2 – цена 7200 рублей за штуку;

Страна разработчик – Россия;

Страна производитель – Россия;

Количество -1 шт.

Стандартный образец номер 3 – цена 5900 рублей за штуку;

Страна разработчик – Россия;

Страна производитель – Россия;

Количество -1 шт.

Итоговая стоимость всей закупки - 534100 рублей.

Помимо затрат на комплектующие, необходимо учитывать заработную плату работника, она будет равняться заработной плате специалиста работающего с ПЭП, то есть 56550 рублей.

Исходя из разницы затрат, можно посчитать разницу в процентном соотношении. Использование ПЭП выгоднее использования ЭМАП на 7%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы:

- была изучена теория напряженно-деформированных состояний;
- были исследованы методы неразрушающего контроля;
- была построена виртуальная модель транспортно-установочного агрегата для исследования НДС в программе ANSYS.

Для динамического исследования был применен метод конечных элементов, позволивший найти части агрегата, испытывающие максимальные нагрузки. Самыми нагруженными участками в процессе динамического анализа оказались: удлинитель, продольная деформация которого увеличивалась при подъеме ТУА. Максимальная деформация достигла значения 45,65 мм. Участок между удлинителем и консолью обладает, максимальным эквивалентным напряжением, которое равно 135,56 Мпа.

Также в ходе выполнения работы были исследованы различные методы акустического НК, позволяющие определять напряженно-деформированные состояния. После их исследования был выбран ультразвуковой метод и произведен расчет по нахождению НДС при помощи ультразвуковых средств измерения.

После проведения вычислений в ANSYS и расчетов по нахождению НДС, были проведены расчеты стоимости для внедрения ультразвуковой дефектоскопии: расчет на закупку необходимого оборудования и последующих работ с ним.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Темис Ю.М. Расчет напряженно-деформированного состояния конструкции методом конечных элементов//Лань: электронно-библиотечная система.-2014. С. 95-100.

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

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

4 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.

5 В.А. Бруяка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. Инженерный анализ в Ansysworkbench//Самарский государственный университет , 2010.С.17- 53.

6 Чабанов, В.Е. Особенности ультразвукового контроля с применением электромагнитно-акустических преобразователей / В.Е. Чабанов, В.А. Жуков. // Санкт-Петербург: ООО «Свен», 2013. С. 10-15.

7 Начаев, В.А. Магнитный метод неразрушающего контроля механических характеристик широкополосных сталей / В.А. Начаев, Н.В. Начаева, О.И. Пирожникова.// Санкт-Петербург национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2008. С. 73-75

8 Ю.В. Василевич, А.М. Якимович, А.М. Язневич, Е.Ю. Неумержицкая, С.А. Зубко. Акустический контроль качества изделия. Ультразвуковой дефектоскоп УД4-т «томографик»././ Минск: БНТУ, 2011. С. 7-20.

9 О.В. Холодилов, В.В. Бурченкова, А.В. Янчилик. Методы и средства неразрушающего контроля// Беларусь, Белорус. Гос. Ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2017. С. 6-17.