

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зам.Зав.кафедрой


В. В. Соловьев

« 15 » июня 2021 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Прогнозирование надежности и работоспособности ТУА на основе  
ультразвуковой диагностики

Исполнитель  
студент группы 717-об

 - 14.06.21  
(подпись, дата)


А. С. Неретина

Руководитель  
Доцент, канд. техн. наук

 14.06.21  
(подпись, дата)


В. В. Соловьев

Консультант по БЖД  
канд. физ-мат. наук

 14.06.2021  
(подпись, дата)

В. Н. Аверьянов

Нормоконтроль

 14.06.2021  
(подпись, дата)

М. А. Аревков

Благовещенск 2021

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

Факультет инженерно-физический  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы  
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика

УТВЕРЖДАЮ

Зам. Зав. кафедрой

  
В. В. Соловьев

« 26 » апреля 2021 г.

### ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента А. С. Неретиной

1. Тема выпускной квалификационной работы: Прогнозирование надежности и работоспособности ТУА на основе ультразвуковой диагностики.  
(утверждена приказом от 5.04.2021 г. №658-уч)
2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 15 июня 2021 года.
3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: разведение захвата – 0,017 ч., закрытие захвата – 0,017 ч., подъезд с использованием собственного механизма передвижения - 0,083 ч., подъем на гидроопорах – 0,033 ч., подъем стрелы до 92 – 0,108 ч., корректировка установки изделия – 0,17 ч., разведение захвата – 0,017 ч., опускание стрелы – 0,108 ч., опускание на гидроопорах – 0,033 ч. (скорости подъема и опускания одинаковы), отъезд – 0,083 ч., закрытие захвата – 0,017 ч., подача напряжения на агрегат – 5,58 ч.
4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): прогнозирование надежности транспортно-установочного агрегата, вероятность безотказной работы транспортно-установочного агрегата, безопасность жизнедеятельности, экономический раздел.
5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.) общий вид стрелы, сборочный чертеж основания стрелы.
6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов): раздел безопасности жизнедеятельности канд. физ-мат. наук Аверьянов Владимир Николаевич
7. Дата выдачи задания 26 апреля 2021 года.

Руководитель выпускной квалификационной работы: Соловьев В. В. доцент, кандидат техн. наук.  
(фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, ученое звание)

Задание принял к исполнению (дата): 26.04.2021 года.



(подпись студента)

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 77 с., 25 рисунков, 5 таблиц, 19 источников.

### ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНЫЙ АГРЕГАТ, НАДЕЖНОСТЬ, РАБОСПОСОБНОСТЬ, БЕЗОТКАЗНОСТЬ, УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И РАБОСПОСОБНОСТИ

В работе исследованы транспортно-установочный агрегат, теория надежности, методы неразрушающего контроля, методы прогнозирования надежности.

Цель работы - провести оценку надежности металлической конструкции транспортно-установочного агрегата с учетом сварочных дефектов присутствующих в сварных соединениях.

Основу методологии исследований составляет теория вероятности работоспособности.

На основании теории вероятности работоспособности была спрогнозирована надежность стрелы транспортно-установочного агрегата.

## СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения .....	7
Введение .....	8
1 Общие сведения о транспортно-установочном агрегате .....	9
1.1 Основные понятия и классификация .....	9
1.2 Устройство и принцип работы транспортно-установочного агрегата .....	12
2 Теория надежности .....	15
2.1 Основные понятия теории надежности .....	15
2.2 Формальная теория надежности .....	17
2.3 Оценка надежности технических систем .....	18
2.4 Количественные характеристики безотказности .....	20
2.5 Структурно-логический анализ технических систем .....	23
3 Методы неразрушающего контроля .....	28
3.1 Классификация методов неразрушающего контроля .....	28
3.2 Методы и виды неразрушающего контроля .....	30
3.3 Классификация методов ультразвукового (акустического) контроля .....	31
4 Расчет надёжности стрелы транспортно-установочного агрегата .....	36
4.1 Исходные данные для расчёта .....	36
4.2 Методика оценки надёжности агрегата на этапе разработки .....	36
4.3 Расчёт надёжности агрегата .....	37
4.4 Методика расчета объема испытаний и оценка показателей надежности .....	43
4.5 Методика оценки показателей надежности по результатам испытаний .....	43
4.6. Результаты расчета .....	44
5 Расчет деформации стрелы ТУА .....	45
5.1 Назначение и описание конструкции стрелы .....	45
5.2 Материал конструкции стрелы .....	48
5.3 Нагрузки .....	50
5.4 Результаты расчёта .....	60

6	Прогнозирование надежности ТУА	63
6.1	Вероятность работоспособности сварных швов	64
6.2	Расчет вероятности безотказной работы основания стрелы	64
7	Раздел безопасности жизнедеятельности	65
7.1	Общие правила по мерам безопасности	65
7.2	Меры пожарной безопасности	66
7.3	Меры взрывобезопасности	67
8	Раздел экономики	70
	Заключение	75
	Библиографический список	76

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

- БЦВМ – бортовая цифровая вычислительная машина;
- ВБР – вероятность безотказной работы;
- ГВСК – гринвичская вращающаяся система координат;
- ГИСК – геоцентрическая инерциальная система координат;
- ГО – головной обтекатель;
- ДУ – двигательная установка;
- ОК – объект контоля;
- ЗИП – запасные части, инструменты, принадлежности;
- КД – конструкторская документация;
- КРК – космический ракетный комплекс;
- НССК – начальная стартовая система координат;
- ОКР – опытно-конструкторская работа;
- ОЧ – отделяющаяся часть;
- ПС – пусковой стол;
- ПУ – пусковое устройство;
- РКН – ракета космического назначения;
- РН – ракета-носитель;
- СК – стартовый комплекс;
- СКО – среднее квадратическое отклонение;
- СС – стартовая система;
- СЧ – составная часть;
- ТАУ – транспортно-установочный агрегат;
- ТЗ – техническое задание;
- ТО – техническое обслуживание;
- УСК – универсальный стартовый комплекс;
- УТК – унифицированный технический комплекс;
- ЭД – эксплуатационная документация.

## ВВЕДЕНИЕ

*Цель работы* – провести оценку надежности металлической конструкции транспортно-установочного агрегата с учетом сварочных дефектов присутствующих в сварных соединениях.

*Задачи:*

- 1) произвести анализ существующих научных работ по теме работы;
- 2) изучить транспортно-установочный агрегат;
- 3) изучить теорию надежности и работоспособности;
- 4) изучить методы прогнозирования надежности и работоспособности.
- 5) применить методы прогнозирования надежности и прочности к транспортно-установочному агрегату.

При решении данных задач определяющее значение приобретают вопросы актуальности выбранной темы работы, а также прогнозирования технического состояния оборудования. Решение этих задач позволяет обосновывать оптимальные стратегии технического обслуживания, обеспечивающие выполнения заданных требований к надежности транспортно-установочного агрегата в течение всего периода его эксплуатации при минимальных затратах средств.



# 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНОМ ОБОРУДОВАНИИ

## 1.1 Основные понятия и классификация

В соответствии с [6]:

– *транспортно-пусковая платформа стартового комплекса* – это специализированный прибор для доставки ракеты космического назначения к пусковому механизму, ее установки на пусковой стол, подготовки к пуску, нахождения в готовности, а также запуска;

– *транспортно-установочная тележка стартового комплекса* – это специализированный прибор для доставки РКН к пусковой установке и ее удержания и/или снятия;

– *транспортно-установочное оборудование стартового комплекса* – это применяемая в определенном стартовом комплексе совокупность транспортно-установочной тележки, транспортно-установочного аппарата и установщика;

– *транспортно-установочный агрегат стартового комплекса* – это специализированное устройство для доставки ракеты космического назначения к пусковому механизму, её установки и/или снятия;

– *установщик стартового комплекса* – это специализированное устройство для установки и/или снятия ракеты космического назначения;

– *стартовый комплекс (СК)* – это комплект технических ресурсов командной точки, одной либо нескольких пусковых конструкций и сооружений с техническими системами.

Главная задачей транспортно-установочного оборудования – это перевозка ракеты с технологического комплекса на стартовый, с дальнейшей установкой на пусковое устройство, а также снятие ракеты с пускового устройства и её транспортировка на технический комплекс, в случае несостоявшегося пуска (прекращения боевого дежурства для оборонных ракет). На транспортно-установочное оборудование также могут быть возложены функции монтажно-

стыковочного оборудования (например, сборка РКН «Союз» завершается на транспортно-установочном агрегате), средства стыковки коммуникаций (обеспечение присоединения коммуникаций РКН, проходящих по транспортно-установочному оборудованию транзитом, с агрегатами и системами стартового комплекса), средства обслуживания (обеспечение доступа обслуживающего персонала к зонам обслуживания РКН), пускового оборудования (обеспечение устойчивости незаправленной РКН на пусковой установке) и т.п.

Транспортно-установочное оборудование может состоять как из одного агрегата (называемого транспортно-установочным), осуществляющего транспортировку и установку полностью собранной РКН, так и из нескольких агрегатов, разделяющих между собой функции транспортного и установочного оборудования – например, транспортировка РКН с технического комплекса на стартовую позицию осуществляется транспортно-установочной тележкой, а перевод в вертикальное положение РКН (вместе с транспортно-установочной тележкой) осуществляется стационарным подъемно-установочным агрегатом.

Транспортно-установочное оборудование ракет классифицируется по следующим *признакам*:

– по способу перевода ракеты в вертикальное положение:

- 1) с использованием способа «вывешивания» ракет;
- 2) с использованием способа «опрокидывания» ракет;

– по типу конструкции силового несущего элемента:

- 1) лафетные установщики;
- 2) порталные установщики;
- 3) установщики с подъемно-направляющей стрелой;
- 4) установщики с подъемно-транспортной стрелой;

– по степени подвижности:

- 1) подвижные (колесные, гусеничные, железнодорожные);
- 2) полустационарные;
- 3) стационарные.

Перевод ракет в вертикальное положение способом «вывешивания» мо-

жет осуществляться мостовыми или стреловыми кранами, стреловыми установщиками-кранами, стреловыми установщиками с захватами.

Установщик с подъемной рамой транспортного средства, изображенный на рисунке 1, представляет собой разновидность полустационарных установщиков лафетного типа. В таких установщиках в качестве стрелы используется рама транспортного средства.

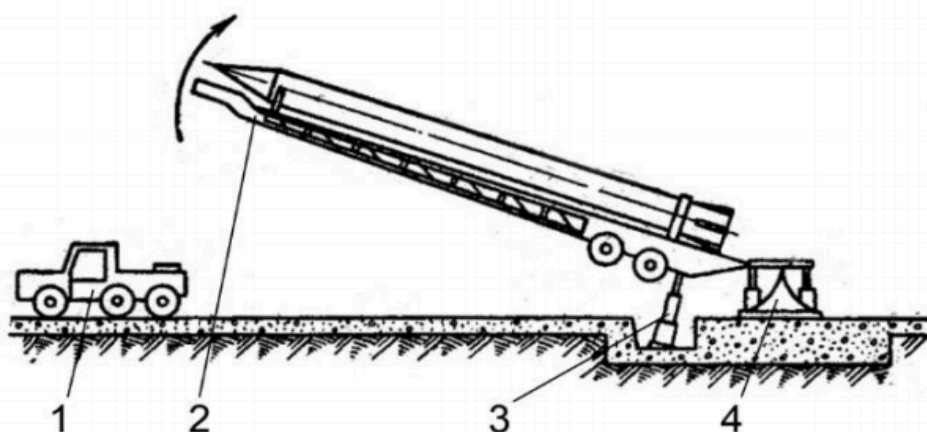


Рисунок 1 – Схема установщика с подъемной рамой транспортного средства: 1 – тягач; 2 – рама транспортной тележки; 3 – гидроподъемник; 4 – пусковой стол [6]

Для установщиков с подъемной рамой транспортного средства справедливы все преимущества, характерные для установщиков с подъемной стрелой. К их числу следует лишь добавить, что, в случае применения установщика с подъемной рамой транспортного средства, перегружать ракету с транспортной тележки на установщик, не требуется – рама тележки выполняет функции стрелы установщика.

В общем случае перевод ракеты в вертикальное положение способом «опрокидывания» включает в себя следующие операции:

- точная доводка транспортно-установочного оборудования к месту подъема;
- ориентация транспортно-установочного оборудования с последующей фиксацией исходного положения;

- вывешивание рамы транспортного агрегата (рамы транспортно-установочного агрегата) для обеспечения устойчивости агрегата к опрокидыванию в процессе подъема ракеты в вертикальное положение и опускания на пусковую установку;
- подъем стрелы агрегата вместе с РКН до ее вертикального положения;
- ориентация корпуса РКН перед опусканием на пусковую установку;
- передача веса РКН на опоры пусковой установки – освобождение узлов крепления РКН на стреле, а также других связей между бортом и стрелой;
- перевод стрелы в горизонтальное (походное) положение;
- отвод рамы со стрелой от пусковой установки.

## **1.2 Устройство и принцип работы транспортно-установочного агрегата 373УН34**

Транспортно-установочный агрегат (ТУА) 373УН34 может эксплуатироваться в любое время года и суток при любых метеорологических условиях, если средняя скорость ветра, замеренная штатным прибором метеослужбы, не превышает 17 м/сек, а температура окружающей среды находится в пределах от минус 40 С до плюс 40 С. Зачехленный ТУА разрешается хранить на открытой площадке при любых метеорологических условиях.

ТУА обеспечивает проведение без капитального ремонта в течение 15 лет не менее 300 циклов работы с ракетами космического назначения (РКН) при условии эксплуатации его в соответствии с инструкцией.

Цикл работы ТУА с РКН включает в себя погрузку нижней части РКН на ТУА, стыковку верхней и нижней части РКН, транспортирование ТУА с РКН с универсального технического комплекса на стартовый комплекс (СК) и установку РКН на ПУ, снятия РКН с ПУ в случае несостоявшейся работы, транспортирование ТУА с РКН от СК на универсальный технический комплекс, отсоединение верхней части РКН и разгрузку нижней части РКН с ТУА.

Транспортно-установочный агрегат представляет собой подъемно-транспортный агрегат на железнодорожном ходу, оборудованный гидроприводом для подъема стрелы с РКН в вертикальное положение и вывешивания ТУА

на гидроопорах и электрооборудованием для приведения в действие исполнительных механизмов и контроля за их положением.

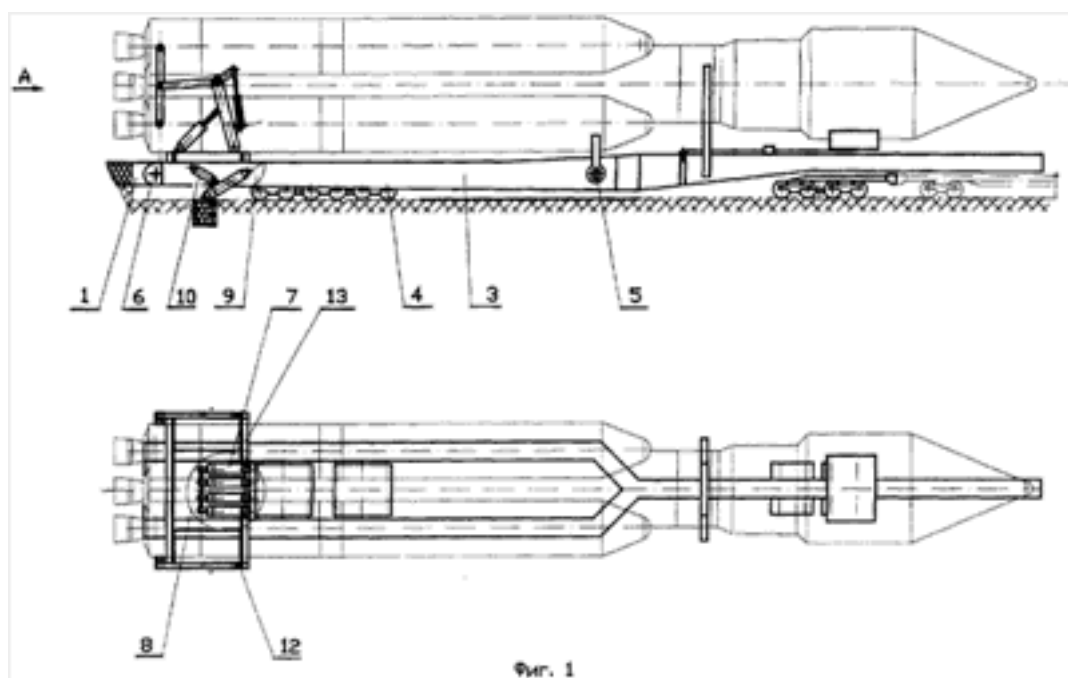


Рисунок 2 – Устройство ТУА [6]

Работает данное устройство ТУА-УСК КРК следующим образом – в процессе укладки РКН мостовыми кранами монтажно-испытательного корпуса на устройства для размещения и крепления 5, расположенные на Y-образной раме-стреле 3 универсального ТУА, захваты транспортировочных цапф 22 гидроманипуляторов 15 посредством тяг-гидроцилиндров 18 и винтовых механизмов 16 надвигаются на цапфы РКН и фиксируются.

После прибытия ТУА с РКН на УСК и стыковки сначала проушин 6 раздвоенной хвостовой части Y-образной рамы-стрелы 3 с проушинами 1 на ПС, посредством железнодорожных тележек с микроприводом 4 ТУА, а затем и проушин 11 с проушинами 2 при помощи гидроцилиндра 10, производится подъем рамы-стрелы 3 ТУА с РКН в вертикальное положение, при этом железнодорожные тележки 4 остаются на рельсах.

Перед установкой РКН на ПС их стартовые опоры совмещают кантованием РКН гидроманипуляторами 15 задней опоры 12 универсального ТУА.

Кантование осуществляется за счет изменения положения транспортировочных цапф 22 РКН под воздействием стрел 19, рукоятей 20, тяг-

гидроцилиндров 18 и винтовых механизмов 16 гидроманипуляторов 15 задней опоры 12 универсального ТУА.

После совмещения стартовых опор РКН и ПС гидроманипуляторы 15 опускают РКН на ПС и удерживают ее до захвата РКН средствами ветрового удержания стартового комплекса.

Далее захваты транспортировочных цапф 22 отводят от РКН винтовыми механизмами 16 гидроманипуляторов 15 задней опоры 12 универсального ТУА, и Y-образная рама-стрела 3 опускается в исходное положение на железнодорожные тележки 4 гидродомкратом 8.

Гидроцилиндр 10 отсоединяет проушины 11 гидродомкрата 8 от проушин 2 закладных частей стартового сооружения и устанавливает гидродомкрат 8 в транспортное положение.

Затем рассоединяются проушины 6 Y-образной рамы-стрелы 3 и проушины ПС 1, после чего универсальный ТУА может занять исходную позицию в МИКе.

## 2 ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ

### 2.1 Основные понятия теории надежности

*Надежность* – это свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных показателей в пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования [2].

Надежность – сложное определение, оно проявляется в 4-х параметрах:

1. *Безотказность* – качество предмета постоянно поддерживать трудоспособное положение на протяжении определенного периода или выработки.

2. *Долговечность* – качество предмета удерживать работоспособность вплоть до максимального состояния с определенным интервалом с целью технологического сервиса и ремонтных работ. Характеристики долговечности: средний ресурс (в единицах выработки), средний период работы (в календарных годах), гамма-процентный источник либо период работы.

3. *Ремонтопригодность (эксплуатационная технологичность)* – качество предмета, содержащееся в его адаптации предотвращению, обнаружению, а также искоренению несогласий.

4. *Сохраняемость* – качество предмета удерживать определенные характеристики свойства в ходе сохранения, транспортирования. Признаками сохраняемости считаются умеренный и гамма-процентный период сохранения.

Безопасность промышленной системы реализуется в ходе ее проектирования, выполняется в ходе ее изготовления, удерживается в ходе эксплуатации. По этой причине предоставление прочности считается значимой проблемой в период проектирования, формирования и использования.

Степень прочности технических систем устанавливается определенными техническими условиями, оценивается численными критериями, чаще всего применяется показатель стабильной эксплуатации.

*Работоспособность* – данное положение предмета, присутствие которого

он может осуществлять установленную функцию с параметрами, определенными условиями технической документации, на протяжении вычисленного времени работы. Безотказностью именуется качество компонента либо целой системы постоянно удерживать функциональность при существовании конкретных обстоятельств эксплуатации (вплоть до 1-го отказа).

*Восстанавливаемой* именуется система, что в ходе собственной работы позволяет восстановление, к невозстанавливаемым – в соответствии с этим систему, что в ходе исполнения собственных функций в зависимости факторов технологического или финансового принципа, осуществление исправлений никак не позволяет. Образцом невозстанавливаемой концепции считаются искусственный спутник Земли.

*Долговечность* – качество компонента либо системы продолжительно удерживать функциональность вплоть до сохранять работоспособность до наступления максимального состояния при конкретных обстоятельствах эксплуатации.

*Живучесть* – умение технологического прибора, сооружения, ресурса либо системы осуществлять главные собственные функции, несмотря на приобретённые дефекты.

*Отказ* – явление, содержащееся в несоблюдении трудоспособного состояния устройства.

*Сбой* – отказ, который ликвидируется самостоятельно.

*Наработка* – время или объём работы до отказа.

*Ресурс* – объём работы или период эксплуатации, на который рассчитывается механизм, сооружение и т. п. После исчерпания ресурса безопасная эксплуатация прибора не обеспечивается, ему необходимо основательное восстановление либо смена.

*Срок службы* – календарная длительность от начала введения в эксплуатацию вплоть до наступления максимального состояния износа.



## 2.2 Формальная теория надежности

С целью прогнозирования уровня проектной надежности изделий можно применить два кардинально отличительные подхода исходя из двух теорий: формальной теории надежности и общей теории надежности. Использование этих теорий позволит обнаружить проектную надежность изделий в зависимости от условий и типа их функционирования.

Согласно формальной теории изменение надежности определяется экспериментально. В процессе эксперимента доказывается, что изменения подчиняются статистическим зависимостям. Но проблема в том, что в этом случае не выясняется физическая сущность проблемы.

Для расчета надежности радиоэлектронной приборов, электроагрегатов и механизмов лучше использовать формальную теорию надежности. Потому что их время работы определяется снашиваемостью. Разработкой в этом направлении занимались учёные Борг, Сотсков, Гнеденко.

Основные количественные характеристики надежности в этом случае связаны со временем работы изделия и определения из большого числа экспериментов. К ним относятся:

1. Среднее время функционирования изделия –  $T$ .
2. Интенсивность отказа –  $\lambda(t)$ .
3. Вероятность безотказного функционирования изделия в течение заданного промежутка времени –  $P(t)$ .

Поясним более подробно смысл второй характеристики –  $\lambda(t)$ . Согласно определению, под *интенсивностью отказа* понимается вероятность того, что изделие, проработавшее до момента времени  $t$ , откажет в следующую единицу времени.

Применение тех или иных показателей зависит от поставленных условий. Например, для определения результативности поражения цели необходимо взять во внимание шансы реализации поставленной задачи. Поэтому в роли показателя надежности мы должны учитывать безаварийной работы изделия.

Вместе с тем, при оценке производительности эксплуатации орбитально-го комплекса нас способен заинтересовать средний период его стабильности функционирования –  $T$ , в таком случае применяется первая характеристика. Среди трёх приведённых черт имеется обоюдно-однозначное соответствие, в таком случае они могут быть выражены посредством друг друга.

### **2.3 Оценка надежности технических систем**

Под технической системой в общем смысле называют тот объект, который реализует заданные функции. При этом, объект может быть раздроблен на части, и каждый элемент сможет выполнять заданные ему функции, взаимодействуя с другими элементами. Также компоненты должны иметь всевозможные параметры. По критерию надёжности их необходимо разбить на группы:

$X_1$  – параметры, изменение которых с выходом за установленные уровни показателей приводит к потере работоспособности элемента и системы;

$X_2$  – параметры, которые участвуют в формировании выходных параметров всей системы, по которым трудно судить об отказе элемента;

$X_3$  – параметры, которые влияют на работоспособность других элементов аналогично изменению внешних условий работы системы.

При наличии сложных систем их части могут обладать одним, двумя или сразу всеми тремя выходными параметрами. В значительной степени характеристики будут зависеть от того, на сколько сильно произошло расчленение системы. Например, системы питания и охлаждения двигателя состоят из сложной структуры и включают большое количество элементов.

При рассмотрении надежности сложной системы ее компоненты целесообразно делить на категории согласно значимости воздействия на безотказность системы:

1. Элементы, отказ которых почти не оказывает большого влияния на функциональность (к примеру, ржавчина декоративного компонента). Отказ подобных компонентов как правило оценивают отдельно от системы.

2. Элементы, функциональность которых за анализируемый период либо выработки почти никак не изменяется.

3. Элементы, возобновления работоспособности которых никак не потребует существенных расходов времени и почти, никак не уменьшает характеристики производительности работы.

4. Элементы, отказы которых приводят к отказу ТУФ и регламентируют его надежность.

Если процесс работы технической системы строиться на выполнении разнокалиберных задач и при неравных эксплуатационных условиях, распределение элементов по группам будет затруднено.

В зависимости от принципа воздействия на надежность сложной системы, ее компоненты возможно рассматривать введенными поочередно либо одновременно. При этом реальная конструктивная модель системы можно показать в виде структурной схемой безотказности. Рассмотрим структурную схему подшипникового узла, состоящего из следующих элементов: 1 – вал, 2 – подшипник, 3 – корпус подшипника, 4 – винты крепления крышки подшипника (4 шт.), 5 – крышка подшипника. Если отказ одного компонента приводит к отказу всей системы, то в таком случае возможно рассматривать, то что компонент включен поочередно. В случае если присутствует отказ компонента система не прекращает работать, в таком случае компонент включен параллельно. В соответствии с этим данными структурная схема подшипникового узла будет представлена в следующем виде:

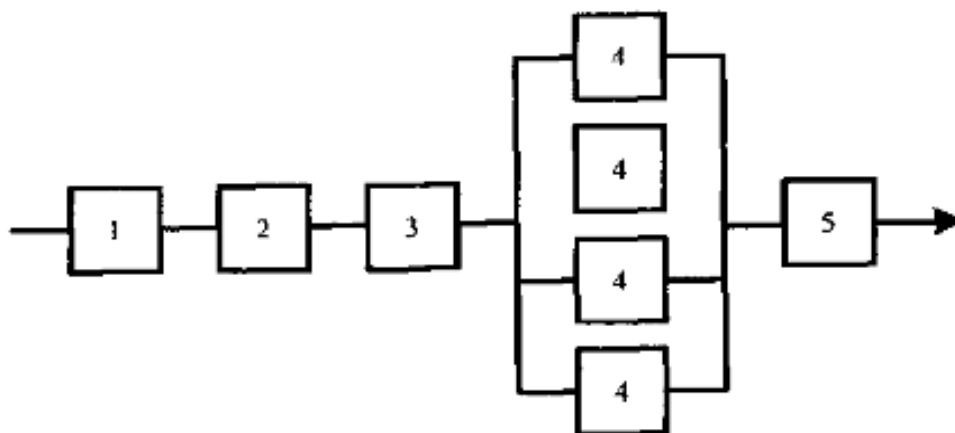


Рисунок 3 – Структурная схема подшипникового узла с позиции его безотказности: 1– вал; 2 – подшипник; 3 – корпус подшипника; 4 – винты крепления крышки подшипника; 5 – крышка подшипника [2]

## 2.4 Количественные характеристики безотказности

*Безотказность* (и другие составляющие свойства надежности) технических систем выражается посредством случайной величины: наработки вплоть до следующего отказа и число отказов за установленный временной период. По этой причине количественными чертами качества здесь представлены вероятностные переменные.

Наработка – это есть продолжительность либо объем эксплуатации. Для ТУА безусловно полагается наработка в единицах периода в то время, как для других технических ресурсов наиболее удобными могут являться прочие средства замера (к примеру, наработка в километрах пробега). Для невозстанавливаемых также и восстанавливаемых устройств определение наработки отличается: во-первых, предполагается наработка вплоть до первого отказа (он же считается последним отказом), во-вторых, среди двумя соседними отказами (после любого отказа выполняется возобновление трудоспособного состояния). Математическое ожидание случайной выработки  $T$  считается чертой безотказности, которая также именуется средней наработкой на отказ (между несколькими отказами). Это отражено в формуле (1):

$$M[T] = \int_0^{\infty} t f(t) dt = T_0, \quad (1)$$

где  $t$  – текущее значение наработки;

$f(t)$  – плотность вероятности её распределения.

*Вероятность безотказной работы* – вероятность того, что в пределах заданной наработки  $t$  отказ объекта не возникнет:

$$p(t) = \text{Вер}(T \geq t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt, \quad (2)$$

где  $F(t)$  – есть интегральная функция распределение случайной наработки  $t$ .

Вероятность обратного события называется вероятностью отказа и дополняет вероятность безотказной работы до единицы:

$$q(t) = \text{Вер}(T \leq t) = 1 - p(t) = F(t). \quad (3)$$

Плотность вероятности  $f(t)$  также является показателем надежности, называемым *частотой отказов*:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dq(t)}{dt} = \frac{d[1 - p(t)]}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt}. \quad (4)$$

Формулы характеризует скорость уменьшения вероятности безотказной работы во времени.

Интенсивностью отказов называют условную плотность вероятности возникновения отказа изделия при условии, что к моменту  $t$  отказ не возник:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)} = -\frac{1}{p(t)} \frac{dp(t)}{dt}. \quad (5)$$

Функции  $f(t)$  и  $\lambda(t)$  измеряются в  $\text{ч}^{-1}$ .

Интегрируя (5), легко получить:

$$p(t) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (6)$$

Данное выражение, именуемое *основным законом надежности*, даёт возможность определить вероятность стабильной работы устройства при любом характере перемены интенсивности отказов во времени. В индивидуальном случае отмечается постоянства интенсивности отказов переходит в известное в теории вероятностей экспоненциальное распределение:

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const.} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} p(t) &= \exp(-\lambda t), \\ F(t) &= 1 - \exp(-\lambda t), \\ f(t) &= \lambda \exp(-\lambda t). \end{aligned} \quad (8)$$

Поток отказов при  $\lambda(t)=\text{const}$  называется *простейшим*, и именно он реализуется для большинства технических систем в течение периода нормальной эксплуатации от окончания приработки до начала старения и износа.

Подставив выражение плотности вероятности  $f(t)$  экспоненциального распределения, указанного в формулах (7) и (1), получим:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda}. \quad (9)$$

Таким образом, при простейшем потоке отказов средняя наработка  $T$  обратна интенсивности отказов  $\lambda$ . С помощью формулы (9) можно показать, что за время средней наработки,  $t=T_0$ , вероятность безотказной работы изделия составляет  $1/\lambda$ . Часто используют характеристику, называемую  $\gamma$  – *процентной наработкой* – время, в течение которого отказ не наступит с вероятностью  $\gamma$  (%):

$$T_\gamma = -\frac{\ln P_\gamma}{\lambda} = -T_0 \ln P_\gamma, \quad P_\gamma = \frac{\gamma}{100}. \quad (10)$$

## 2.5 Структурно-логический анализ технических систем

Окончательная задача надежности технических устройств заключается в само оптимизации проектных заключений и характеристик, систем работы, структуры технического обслуживания и ремонтных работ. По этой причине

ранее на стадиях проектирования немаловажно дать оценку надежности предмета, обнаружить наиболее небезопасные узлы и элементы, также установить более результативные мероприятия по совершенствованию характеристик надежности. Данные проблемы можно решить путем заблаговременного структурного и логического рассмотрения системы.

Большая часть технических объектов представляют из себя сложные системы, состоящие из единичных конструкций, элементов, узлов, приборов управления и т. д. Техническая система (ТС) – это комплекс технических устройств (компонентов), специализированных с целью исполнения конкретной функции либо функций. В соответствии с этим, компонент считается обязательной составляющей системы.

Разделение ТС на компоненты довольно относительно и находится в зависимости от постановки проблемы расчёта надежности. К примеру, при рассмотрении степени результативности технологической линии ее компоненты. В свою очередь, станки и приборы могут расцениваться техническими системами и при оценке их надежности обязаны делиться на компоненты – узлы, конструкции, которые, в свою очередь – на элементы.

При определенной структуре ТС, в первую очередь следует дать оценку воздействию любого компонента также его работоспособность на работоспособность системы в полном. Следовательно, рационально разбить все компоненты на четыре категории:

1. Компоненты, отказ которых почти не оказывает большое влияние на функциональность системы (к примеру, деформирование кожуха, изменение окраски поверхности и т.п.).

2. Компоненты, функциональность которых за период эксплуатации почти никак не меняется и возможность стабильной работы близка к единице (корпусные элементы, малонагруженные компоненты с огромным резервом надежности).

3. Компоненты, восстановление либо регулирование каковых вероятно в процессе работы устройства, либо в период планового технологического

сервиса (настройка, либо смена технологического инструмента оборудования, полезные доработки ТС и т.д.).

4. Компоненты, отказ которых самостоятельно либо в комбинации с отказами иных компонентов приводит к отказу системы в целом.

Несомненно, при рассмотрении надежности ТС есть значимость во включении только лишь элементов заключительной категории.

С целью проведения расчетов характеристик надежности удобного применения структурно-закономерных схем надежности ТС, которые показывают связь компонентов, а также их воздействие на функциональность системы в целом. Структурно-логическая модель предполагает собой комплекс прежде выделенных компонентов, объединенных друг с другом поочередно либо одновременно. Основным критерием для установления типа объединения компонентов (последовательно либо синхронно) при построении схемы считается воздействие их отказа на работоспособность ТС.

*Последовательным* (с точки зрения надежности) считается соединение, при котором отказ любого элемента приводит к отказу всей системы, что показано на рисунке 4.

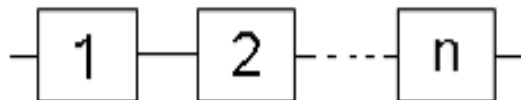


Рисунок 4 – Последовательное соединение элементов [2]

*Параллельным* считается соединение, при котором отказ любого элемента не приводит к отказу системы, пока не откажут все соединенные элементы, указанные на рисунке 5.



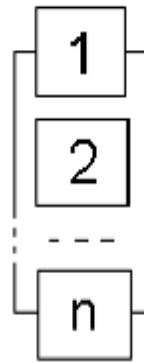


Рисунок 5– Параллельное соединение элементов [2]

$$R_0 = R_1 \times R_2 \times R_3 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i. \quad (11)$$

$$R_i=0.99, \text{ то } R_0=0,99^{50}=0,55.$$

Безотказность сложной системы, складывающейся из поочередно введенных компонентов, обуславливается появлением возможностей стабильной деятельности компонентов как совместно наблюдаемых явлений. К примеру, система включает 50 компонентов с равной безотказностью. Из приведенного примера наблюдается повышение числа компонентов при их поочередном введении, что приводит к уменьшению безотказности сложной системы. Необходимо пояснить, что «последовательным» подобное объединение компонентов считается только лишь в значении надежности, на физическом уровне они могут являться объединенными по-разному.

Для реальных компонентов безотказность считается неустойчивой величиной, исходящей от выработки, ее возможно сформулировать законом распределения возможностей, представленным на рисунке 6.

$$F_1(1) = \int_0^f f(t)dt. \quad (12)$$

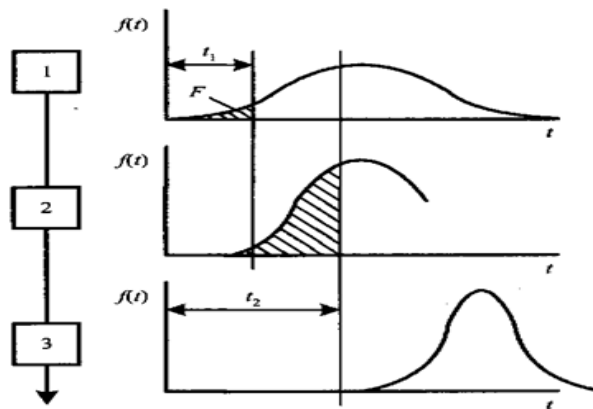


Рисунок 6 – Схема влияния наработки системы на вероятность отказа ее элементов [2]

На рисунке 6 видно, что при существовании наработки  $t_1$  максимальной возможностью отказа будет обладать первый компонент, но появление повышения наработки до величины  $t_2$  возможность отказа второго компонента способна значительно возрасти. Третий компонент в приведенных значениях наработки остается практически стабильным. Исходя из этого с целью увеличения безотказности системы, складывающейся с поочередно включенных компонентов, главным образом необходимо увеличивать надежность более «слабых» компонентов. В одинаковой мере повышать средний источник абсолютно всех компонентов системы бессмысленно.

При параллельном включении элементов, указанных в рисунке 6, сложная система откажет только при отказе всех  $m$  элементов, вероятность совместного наблюдения этих событий

$$F_0 = F_1 \times F_2 \dots F_m = \prod_{i=1}^m F_i. \quad (13)$$

Безотказность сложной системы:

$$R_0 = 1 - \prod_{i=1}^m F_i, \text{ или } R_0 = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - R_i). \quad (14)$$

Для системы, состоящей из трех компонентов с безотказностью 0,9

единая безотказность. Поэтому повышение количества синхронно включенных компонентов повышает исправность сложной системы.

$$R_0 = 1 - (1 - 0,9)^3 = 0,999. \quad (15)$$

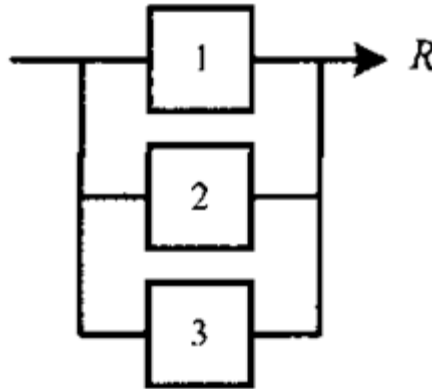


Рисунок 7– Структурная схема безотказности системы из трех параллельно включенных элементов [2]

Схемы структуры безотказности делаются с учетом воздействия на отказ ее компонентов, которые относительно являются объединенными поочередно либо параллельно. При этом определяются и анализируются два типа общих событий: выйдет из строя ни один компонент либо все компоненты. В множестве вариантах проще изучить все без исключения вероятные состояния сложной системы, рассматривая любое как двойственное явление. Для проведения данного рассмотрения оформляются структурные схемы состояний сложной системы, которые предоставляют понимание об абсолютно всех вероятных комбинациях состояний компонентов, также любое сочетание рассматривается как двойственное явление.

## 3 МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

### 3.1 Классификация методов неразрушающего контроля

Все методы НК классифицируются по следующим признакам:

1) по характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом. Под характером взаимодействия физического поля или вещества с ОК подразумевается непосредственное взаимодействие поля или вещества с контролируемым объектом, но не с проникающим веществом;

2) по первичному информативному параметру. Под первичным информативным параметром подразумевается одна из основных характеристик физического поля, регистрируемая после взаимодействия этого поля с ОК;

3) по способу получения первичной информации. Под первичной информацией подразумевается совокупность характеристик физического поля, регистрируемая после взаимодействия этого поля с ОК [8].

На рисунке 8 приведена классификационная схема акустических методов НК по [8].



Рисунок 8 – Классификация акустических методов контроля [8]

Акустические методы подразделяются на две большие группы. Одна из них использует излучение и прием акустических колебаний и волн (активные методы), вторая – только прием колебаний и волн (пассивные методы). Колеба-

ния в последнем случае возбуждаются под действием процессов, происходящих в самом ОК. В каждой из этих групп можно выделить методы, основанные на возникновении в ОК, бегущих и стоячих волн или колебаний, указанных в рисунке 9.

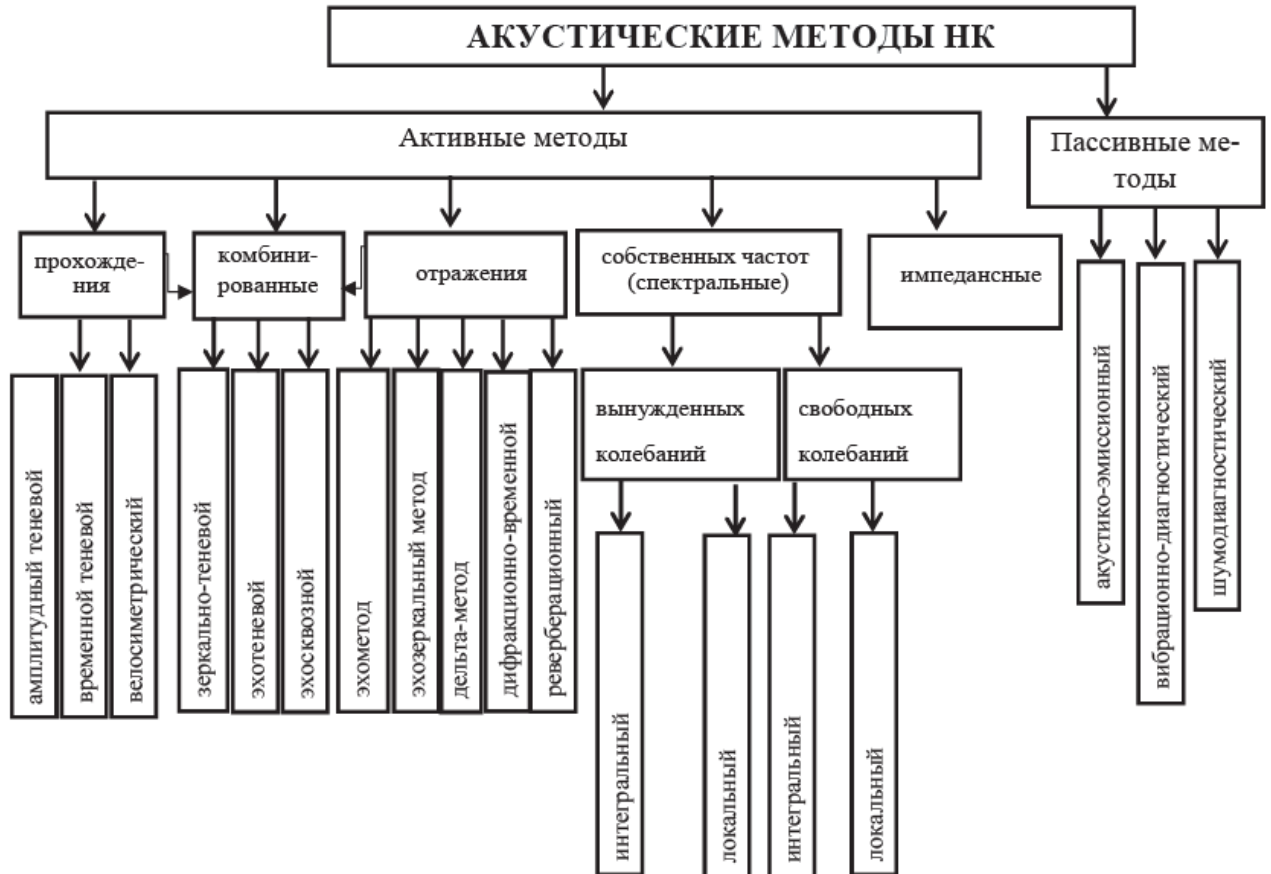


Рисунок 9 – Классификация акустических методов контроля и диагностики [8]

*Активные акустически методы*, в которых применяют бегущие волны, делят на подгруппы: методы, использующие прохождение, отражение волн, и комбинированные методы, в которых применяют как отражение, так и прохождение.

*К пассивным методам* относят акустико-эмиссионный метод, в котором используют бегущие волны. Явление *акустической эмиссии* (от лат. emissio – испускание, излучение) состоит в излучении упругих волн материалом объекта контроля, в результате внутренней динамической локальной перестройки его структуры.

Методы по диагностики шума и вибрации также относятся к пассивным методам. Первый метод подразумевает использование контактных приемников, которые способны продиагностировать характер вибрации каждой детали или узла по отдельности. При реализации второго метода используются микрофон и приборы по анализу спектра, таким образом диагностируется уровень шума механизма в рабочей состоянии.

В процессе применения колебательных методов свободные колебания появляются из-за воздействия на объект извне с определенной периодичностью, для возникновения вынужденных колебаний необходимо постоянное воздействие генератора на объект, при это частота должна изменяться. Термин «измеряемые величины» означает частоту свободных колебаний или резонансов вынужденных колебаний.

### **3.2 Методы и неразрушающего контроля**

Неразрушающий контроль, в зависимости от физических явлений, положенных в его основу, подразделяется на виды:

1) *магнитный* – вид неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом;

2) *электрический* – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с контролируемым объектом или возникающего в контролируемом объекте в результате внешнего воздействия;

3) *вихретоковый* – вид неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте;

4) *радиоволновой* – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом;

5) *тепловой* – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов,

вызванных дефектами;

6) *оптический* – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом;

7) *радиационный* – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом. В наименовании методов контроля слово «радиационный» может заменяться словом, обозначающим конкретный вид ионизирующего излучения (например, рентгеновский, нейтронный и т.д.);

8) *акустический* – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте. При использовании упругих волн ультразвукового диапазона частот (выше 20 кГц) допустимо применение термина «ультразвуковой» вместо термина «акустический»;

9) *проникающими веществами* – вид неразрушающего контроля, основанный на проникновении веществ в полости дефектов контролируемого объекта .

При выявлении невидимых или слабовидимых глазом поверхностных дефектов, термин «проникающими веществами» может изменяться на «капиллярный», а при выявлении сквозных дефектов – на «течеискание».

### **3.3 Классификация методов ультразвукового (акустического) контроля**

*Ультразвуковая дефектоскопия* – это метод неразрушающего контроля, который позволяет находить дефекты благодаря отраженным от препятствий волнам.

Задачами ультразвуковой дефектоскопии:

- обнаружить дефекты (несплошности);
- определить их расположения;
- оценить размер дефектов;
- определить свойства дефектов (тип, ориентация).

Ультразвук распространяется в пространстве волнами. *Фронт волны* – это граница, отделяющая колеблющиеся частицы среды от частиц, ещё не начавших колебаться. Волновые поверхности непрерывно перемещаются в среде и при этом деформируются. В однородной и изотропной среде скорость каждой точки волновой поверхности направлена по нормали к поверхности и численно равна скорости  $c$ , называемой фазовой скоростью волны.

На практике ультразвуковые волны наиболее эффективно используются в диапазоне частот от 0.5 МГц до 25 МГц. Эффект взаимодействия волн с внутренними дефектами снижается при работе с низкими частотами, в таких случаях сложно обнаружить дефекты в металлических структурах, т. к. волны с большей длиной уже огибают дефекты. Но на практике при контроле бетонных изделий используются длинные волны для поиска дефектов, т. к. при работе с такими материалами существуют свои требования, выявляются только крупные дефекты с помощью использования длинных волн.

В основе ультразвукового метода заложен принцип прямого пьезоэлектрического эффекта. Излучателем и приёмником ультразвуковых колебаний является пластина, вырезаемая из монокристалла кварца или пьезокерамического материала – например, титаната бария. Под действием знакопеременного напряжения пьезопластина изменяет свои размеры (растягивается или сжимается), преобразуя электрические колебания в механические.

*Основные характеристики пьезоэлементов:*

- частотный спектр;
- излучаемая мощность звука;
- направленность излучения.

Пьезопластину помещают в преобразователь, для ввода колебаний в деталь между контактной поверхностью преобразователя и деталью наносят слой смазки. Колебания пьезопластины передаются рядом расположенным частицам, т. е. возбуждаются и распространяются упругие волны, распространяющиеся направленным пучком лучей. Отражённые от препятствия звуковые колебания принимаются и преобразуются в импульсы, наблюдаемые на экране, по-



казанные на рисунке 10.

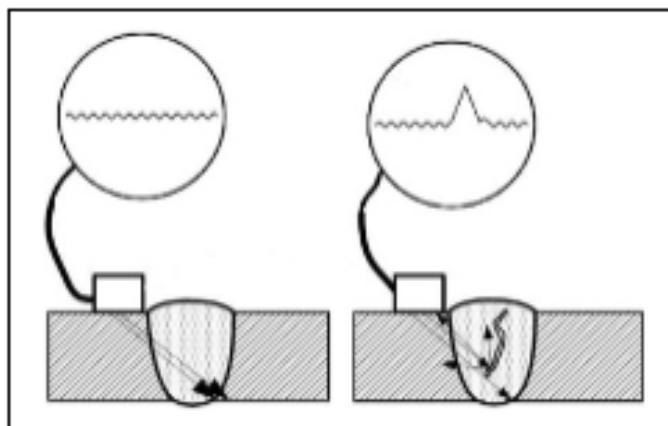


Рисунок 10 – Схема обнаружения дефекта [8]

От правильности выбора методики зависит надёжность ультразвукового контроля, а выбор методики в свою очередь основывается на характеристиках контролируемого изделия, материала из которого оно изготовлено, а также дефектов.

Сейчас существует несколько способов обнаружения дефектов при использовании ультразвукового контроля: теневой, эхо-метод, эхо-зеркальный, зеркально-теневой. Основные различия между методами заключаются в оценке и регистрации данных.[9]

1. *Диагностика теньвым методом*, где используются 2 преобразователя по разные стороны исследуемой детали, один из них излучает волны, а предназначение второго – принимать их, что отражено на рисунке 11.

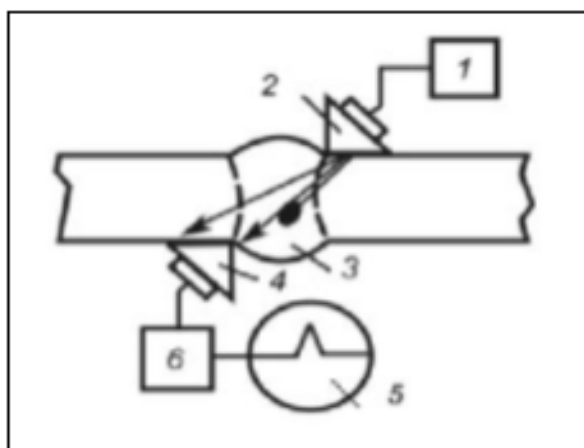


Рисунок 11 – Теневой метод: 1 – генератор; 2,4 – пьезоэлектрический преобразователь; 3 – шов; 5 – дефектоскоп; 6 – усилитель [9]

Преобразователь устанавливается по перпендикулярной плоскости исследуемого сварного шва. Процесс представляет собой контроль отражённого излучения. Тот участок, где излучаемый сигнал не доходит до второго преобразователя, признаётся дефектным, т. е. наличие несплошности.

2. При *эхо-методе* используется один преобразователь. Принцип действия эхо-метода: отправленная преобразователем звуковая волна отражается от участка с дефектом и принимается преобразователем; если излучаемая волна прошла контролируемый участок насквозь, т. е. безвозвратно, участок признаётся бездефектным, в противном случае отражённая волна возвращается к преобразователю, а дефектоскоп отмечает это место как дефект.

3. В *эхо-зеркальном методе* используется такой же принцип работы, как и в эхо-методе. Отличительной особенностью является применение отражателя. Устанавливается оборудование под прямым углом, волны посылаются к материалу, в случае наличия повреждений отражаются на приемнике. Используют при поиске вертикальных дефектов, указанных на рисунке 12.

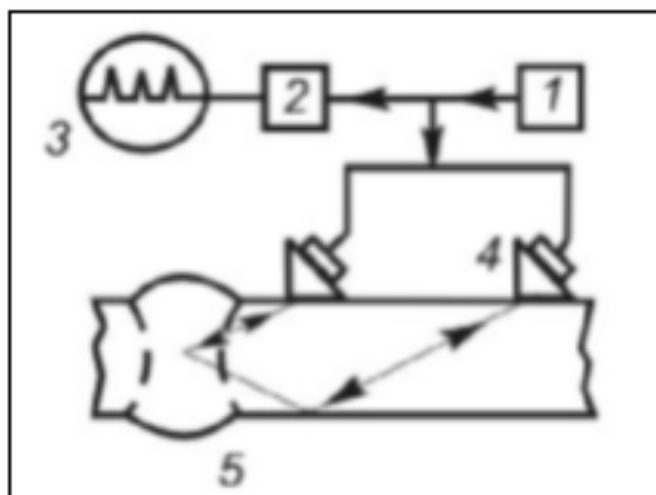


Рисунок 12 – Эхо-зеркальный метод «Тандем»: 1 – генератор; 2 – усилитель; 3 – дефектоскоп; 4 – пьезоэлектрический преобразователь; 5 – контролируемая деталь (шов) [9]

3) *Зеркально-теневого метод* является слиянием зеркального и теневого метода. Он заключается в использовании двух приборов, посылающих косые волны, устанавливаемых с одной стороны контролируемого объекта. Отраже-

ние происходит от поверхности исследуемого материала в случае, если отражённая волна не доходит до второго преобразователя, место маркируется как дефект, что показано на рисунке 13.

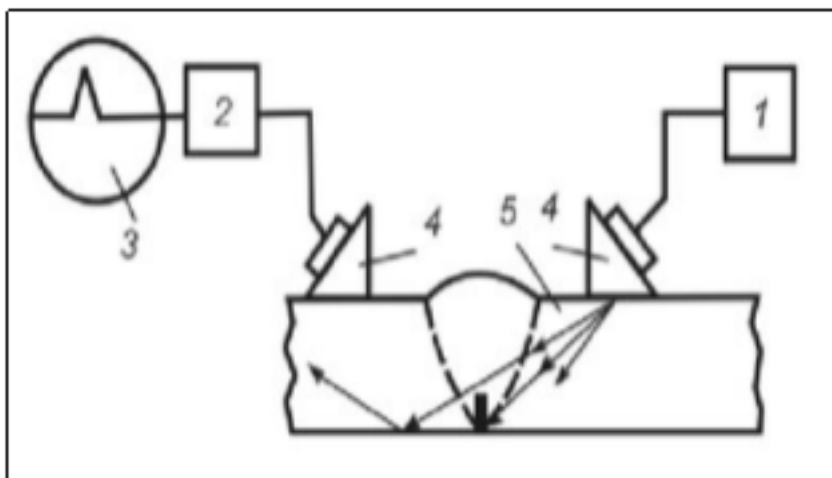


Рисунок 13 – Зеркально-теневого метод: 1 – генератор; 2 – усилитель; 3 – дефектоскоп; 4 – пьезоэлектрический преобразователь; 5 – контролируемая деталь (шов) [9]

## 4 РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСПОРТНО-УСТАНОВОЧНОГО АГРЕГАТА

### 4.1 Исходные данные для расчета

Основные допущения, принятые в расчете:

- отказы элементов образуют простейший поток, то есть обладают свойствами ординарности, стационарности и отсутствия последействия;
- закон распределения наработки до отказа элементов подчиняется экспоненциальному закону (в этом случае интенсивность отказа есть величина постоянная);
- все элементы одного наименования являются равнонадежными, имеющими одинаковую величину интенсивности отказов;
- надежность механических элементов и металлоконструкции не оценивается, так как она обеспечивается необходимыми запасами прочности и подтверждается соответствующими расчетами. Проводится контроль показателей надежности только тех силовых элементов, запасы прочности которых ниже 1,5;
- расчет среднего времени восстановления ТУА выполняется без учета времени доставки заменяемого элемента из ЗИП с использованием данных о реальном времени восстановления подобных элементов, подтвержденными результатами эксплуатации агрегатов - аналогов;
- при выполнении расчетов считается, что выполнен полный объем ТО в соответствии с требованиями ЭД и агрегат к началу рабочего цикла полностью работоспособен.

ТУА может находиться в следующих состояниях:

- «готовность к применению» - в котором ТУА технически исправен, готов к применению и находится в режиме кратковременного хранения между пусками;
- «готовность к приему РКН» - в котором ТУА готов к проведению работ по приему РКН, как на УТК РКН, так и на СС (в случае отмены пуска).

Для выполнения оценки надежности ТУА приняты следующие продол-

жительности операций:

- разведение захвата – 0,017 ч;
- закрытие захвата – 0,017 ч;
- подъезд с использованием собственного механизма передвижения - 0,083 ч (из расчета передвижения на расстояние 10м);
- подъем на гидроопорах – 0,033 ч;
- подъем стрелы до 92 – 0,108 ч;
- корректировка установки изделия – 0,17 ч;
- разведение захвата – 0,017 ч;
- опускание стрелы – 0,108 ч;
- опускание на гидроопорах – 0,033 ч (скорости подъема и опускания одинаковы);
- отъезд – 0,083 ч;
- закрытие захвата – 0,017 ч;
- подача напряжения на агрегат – 5,58 ч.

Подъезд и отъезд, подъём и опускание на гидроопорах, закрытие и разведение захватов - производятся по одинаковым цепям управления, поэтому расчетные таблицы составлены только для одной из этих разноименных операций.

Интенсивность отказов  $i$ -го элемента при выполнении операций штатного цикла –  $\lambda_i$ :

$$\lambda_{ixp} = 0,01 \cdot \lambda_i. \quad (16)$$

#### **4.2 Методика оценки надежности агрегата на этапе разработки КД**

Расчет надежности ТУА на этапе разработки КД выполняется в соответствии с ГОСТ В 21697-83.

#### **4.3 Расчёт надёжности агрегата**

Исходя из условий применения, ТУА относится к изделиям конкретного использования, многократного циклического применения, восстанавливаемым и обслуживаемым с определенной периодичностью.

Расчёт надёжности агрегата проводится в следующей последовательности:

- составляются структурные схемы надёжности операций заданного цикла;
- разрабатываются таблицы, в которых приводятся элементы СЧ в соответствии со структурными схемами надёжности, исходные справочные значения показателей надёжности элементов;
- проводится оценка показателей надёжности ТУА в соответствии с требованиями ТЗ;
- сравниваются расчетные значения показателей надёжности агрегата с заданными в ТЗ.

ВБР ТУА  $P(t_{ц})$  в течение штатного цикла применения вычисляется по формуле:

$$P(t_{ц}) = \prod_{z=1}^N P_z(t), \quad (17)$$

где  $N$  – количество операций штатного цикла;

$P_z(t)$  – ВБР ТУА при выполнении  $z$ -й операции.

ВБР  $P_z(t)$  при выполнении  $z$ -й операции вычисляется по формуле:

$$P_z(t) = P'_z(t) * P''_z(t), \quad (18)$$

где  $P'_z(t)$  – ВБР участка звена структурно-функциональной схемы при последовательном соединении элементов;

$P''_z(t)$  ВБР – участка звена цепи при параллельном соединении элементов.

При последовательном соединении элементов  $P'_z(t)$  определяется по формуле:

$$P'_z(t) = \exp(-\sum_{i=1}^m n_i * \lambda_i * t_i), \quad (19)$$

где  $m$  - число типов элементов, задействованных в  $z$ -й операции;

$\lambda_i$  - интенсивность отказов элемента  $i$ -го типа при работе;

$t_i$  - время работы  $i$ -го элемента в  $z$ -й операции;

$n_i$  - количество элементов  $i$ -го типа.

При параллельном соединении элементов в структурно-функциональной схеме нагруженного резервирования  $P_z''(t)$  вычисляется по формуле:

$$P_z''(t) = 1 - [\prod_{i=1}^n P_i(t)] * [1 - \prod_{j=1}^m P_j(t)], \quad (20)$$

где  $\prod_{i=1}^n P_i(t)$  – ВБР основной цепи;

$\prod_{j=1}^m P_j(t)$  – ВБР основной цепи;

$n, m$  – число  $i$ -х элементов в основной и резервной цепях соответственно.

При параллельном соединении в случае ненагруженного резервирования  $P_z''(t)$  вычисляется по формуле:

$$P_z''(t) = \exp(-\lambda_0 * t * \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 * t)^i}{i!}), \quad (21)$$

где  $\lambda_0$  – интенсивность отказов основной цепи.

СКО ВБР  $\sigma_p$  вычисляется по формуле:

$$\sigma_p = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial P}{\partial P_i}\right)^2 * [\sigma(P_i)]^2}. \quad (22)$$

Нижнее интервальное значение ВБР ТУА  $P_n(t_u)$  в течение штатного цикла применения рассчитывается по формуле:

$$P_n(t_u) = P(t_u) - \sigma_p * U\gamma, \quad (23)$$

где  $U_\gamma$  квантиль нормального распределения показателя с доверительной вероятностью  $\gamma$ , равной 0,9.

ВБР с учетом восстановления отказавших элементов вычисляется по формуле:

$$P(t) = P'(t) + (1 - P'(t)) * P_B(t_\partial), \quad (24)$$

где  $P'(t)$  – ВБР за рассматриваемое время  $t$ .

$P_B(t_\partial)$  – вероятность восстановления отказавших элементов за допустимое время  $t_\partial$ .

$$P_B(t_\partial) = \exp\left(-\frac{T_B}{t_\partial}\right), \quad (25)$$

где  $T_B$  – среднее время восстановления ТУА;

$t_\partial$  – допустимый перерыв в работе.

Среднее время восстановления ТУА  $T_B$  определяется по формуле:

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i * \lambda_i * t_{vi})}{\sum_{i=1}^m (n_i * \lambda_i)}, \quad (26)$$

где  $t_{vi}$  - среднее время восстановления элемента  $i$ -го типа;

$m$  - количество типов элементов ТУА, в том числе незадействованных в структурной схеме надежности.

Значения  $t_{vi}$  выбираются с учетом результатов эксплуатации элементов-аналогов и удобства доступа к /-му элементу. При этом предполагается, что восстановление такого элемента производится путем его замены на исправный элемент.

Вероятность исправного состояния элементов в промежутках между ра-



ботами (проверками)  $P_{xp}(t_{xp})$  определяется по формуле:

$$P_{xp}(t_{xp}) = \exp(-\lambda_{ixp} * t_{ixp}), \quad (27)$$

где  $\lambda_{ixp}$  - интенсивность отказов  $i$ -го элемента, находящегося в нерабочем состоянии;

$t_{ixp}$  - длительность хранения  $i$ -го элемента.

Вероятность безотказной работы элементов, обслуживаемых только во время ежегодных ТО, с учетом длительности хранения  $P(t, t_{xp})$  определяется по формуле:

$$P(t, t_{xp}) = P(t) * P_{xp}(t_{xp}). \quad (28)$$

Вероятность безотказной работы с учетом априорной информации определяется методом объединенных оценок надежности  $P_0$ , когда информация задается в виде точечных оценок показателей надежности и их дисперсий:

$$P_0 = \frac{\hat{P} + \rho * P^a}{\rho + 1}. \quad (29)$$

$$\rho = \frac{D_{\hat{P}}}{D_{P^a}}. \quad (30)$$

$$D_p = \sigma_p^2. \quad (31)$$

$$D_{P_0} = \frac{D_{\hat{P}} * D_{P^a}}{D_{\hat{P}} + D_{P^a}}; \quad (32)$$

где  $P^a$  – расчетное (априорное) значение показателя  $P$ ;

$\hat{P}$  – значение показателя надежности, полученное экспериментальным путем;

$P_0$  – обобщенное (расчетно-экономическое) значение показателя  $P$ ;

$D_p$  – дисперсия соответствующего показателя  $P$ ;

$P$  – коэффициент пересчета.

#### **4.4 Методика расчета объема испытаний и оценка показателей надежности**

Минимальный объем испытаний, необходимый для подтверждения (контроля) заданных требований к надежности, определяется по формуле:

$$N_{min} = \frac{\ln(1-\gamma)}{\ln P_n}, \quad (33)$$

где  $P_n$  - нижнее значение ВБР, заданное в ТЗ;

$\gamma$ - доверительная вероятность.

#### **4.5 Методика оценки показателей надежности по результатам испытаний**

Оценка ВБР  $\hat{P}$  и ее СКО  $\sigma_{\hat{P}}$  по результатам испытаний при отсутствии отказов определяются по формулам:

$$\hat{P} = 1 - \frac{1}{2*(N+2)}, \quad (34)$$

$$\sigma_{\hat{P}} = \frac{1}{2*(N+2)} \sqrt{\frac{5*N+7}{N+3}}, \quad (35)$$

где  $N$  – количество циклов испытаний.

Оценка ВБР  $\hat{P}$  и ее СКО  $\sigma_{\hat{P}}$  при наличии отказов вычисляются по формулам:

$$\hat{P} = 1 - \frac{m}{n}. \quad (36)$$

$$\sigma_{\hat{p}} = \sqrt{\frac{\hat{p}^*(1-\hat{p})}{n-1}}, \quad (37)$$

где  $m$  – количество отказов в течение наработки  $n$ .

#### 4.6 Результаты расчета

Для проведения расчета надежности ТУА по результатам анализа принципиальной гидравлической (373УН34.0400.000 ГЗ) и принципиальной электрической (373УН34.0600.000 ЭЗ) схем, строятся структурные схемы надежности ТУА при выполнении отдельных операций доставки и установки РКН, входящих в штатный цикл применения ТУА. Пример структурной схемы надежности ТУА приведен на рисунке 14. В таблицах 1 представлены наименования и обозначения элементов схемы электрической принципиальной 373УН34.0600.000 ЭЗ и схемы гидравлической принципиальной 373УН34.0400.000 ГЗ, входящие в состав структурных схем надежности ТУА.

В каждой структурной схеме надежности ТУА отображены те элементы, отказ которых приводит к отказу (невыполнению) конкретной операции.

Расчет показателя ВБР каждой операции производится по формулам (17) - (21), расчет СКО ВБР производится по формуле (22).

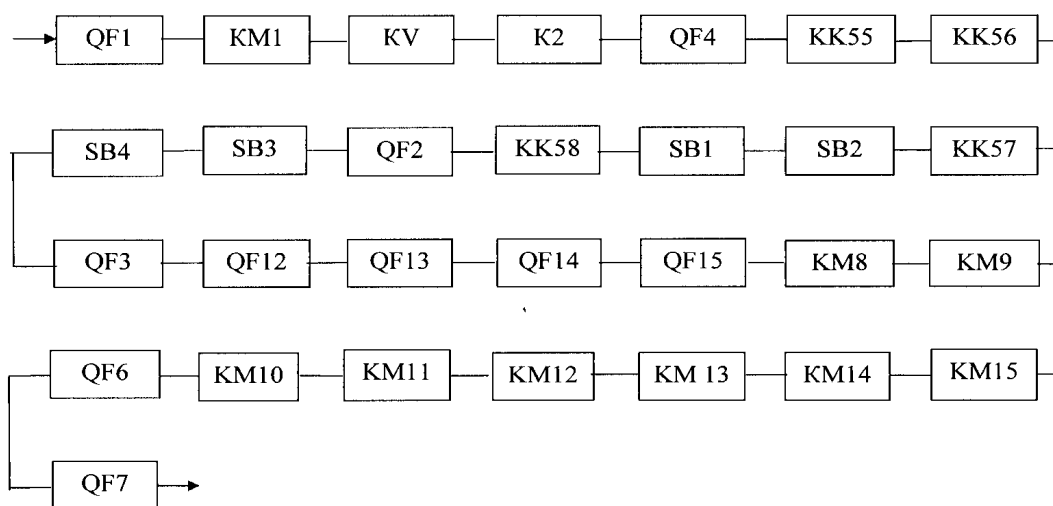


Рисунок 14 – Структурная схема надежности операции «Подача напряжения» [15]

Таблица 1 – Исходные данные для оценки ВБР операции «Закрытие (открытие)» [15]

Обозначение элемента	Наименование элемента	Количество, п	Интенсивность отказов $\lambda_i * 10^6$ ,	Время t, ч	$\lambda_i * n_i * t * 10^6$
К3, К8, К9, К47, К48	Реле РНЕ 66 ТУ16.535.160-80	5	0,0300	0,085	0,0128
К3 9 - К42	Реле РПК67 РВИМ.647614.07 9- 04	4	0,0305		0,0104
КМ8, КМ9, КМ10, КМ11	Контактор КНЕ030У, 27 В ТУ 16-94 БКЖИ644131001 ТУ	4	0,0300		0,0102
КМ20 - КМ23	Контактор LC1- D40AM7, катушка переменного тока 220 В	4	0,0280		0,0095
SA14	Тумблер ПТ2- 30В УС0.360.054ТУ	1	0,0200		0,0017
VD23 - VD26	Диод Д203А 0,3 А ТР3.362.021	4	0,0570		0.0194
HL13	Излучатель полупроводниковый ИПЛ036.024В- 22СВ АЕ- ЯР 432230 501	1	0,0400		0,0034
М1, М2	Асинхронный двигатель 5А80МВ4ТМ1 380В	2	32,9200		5,5964
Итого					

В результате проведенного расчета получены следующие значения показателей надежности ТУА:

– вероятность безотказной работы ТУА при выполнении операций штат-

ного цикла составляет  $P(t_u) = 0,9936$ ;

– среднее время восстановления работоспособности ТУА силами эксплуатирующего персонала, без учета времени доставки оборудования из ЗИП составляет  $T_g = 0,82$  ч.

- минимальный объем, необходимый для подтверждения нижнего значения вероятности безотказной работы, равного 0,95 с доверительной вероятностью 0,9, составляет 45 циклов.

## 5 РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИИ СТРЕЛЫ ТУА

### 5.1 Назначение и описание конструкции стрелы

Стрела предназначена для крепления на ней РН («Союз-2» этапов 1а, 1б или «Союз-2» этапа 1в) при её транспортировке от монтажно-испытательного корпуса к стартовому комплексу, подъёме и установке на стартовое сооружение.

В процессе транспортировки и при подъёме крепление ракетносителя должно находиться на трех опорах. Работа по помещению изделия на опорные стойки проводится по определённым правилам, необходимо организовать равномерность касания корпуса на опоры. Верхний захват ТУА помещается соответственно на верхнем опорном элементе. Стрела изделия должна быть закреплена на трех уровнях опоры. Средний уровень подвижный по направлению радиуса, так как такое устройство необходимо для разгрузки корпуса подпорных элементов. Все три уровня опор и механизм подвески надежно держат изделие в области стрелы, делая транспортировку и подъём безопасным. Двухступенчатый гидроцилиндр поднимает стрелу ТУА, приводя её в вертикальное положение. Устойчивость ТУА с вертикально поднятой стрелой обеспечивается двумя гидроопорами, установленными на крыльях платформы. Перед подъемом стрелы ТУА платформа агрегата крепится к кронштейнам на месте работы двумя механизмами доводки, с помощью которых можно перемещать в продольном направлении агрегат, вывешенный на гидроопорах, в пределах  $\pm 50$  мм.

Конструктивно стрела состоит из трёх основных частей: консоли, основания и удлинителя. В процессе моделирования были учтены все особенности их конструкций

Конструктивная схема стрелы с размещенными на ней опорами для РН представлена на рисунке 15.

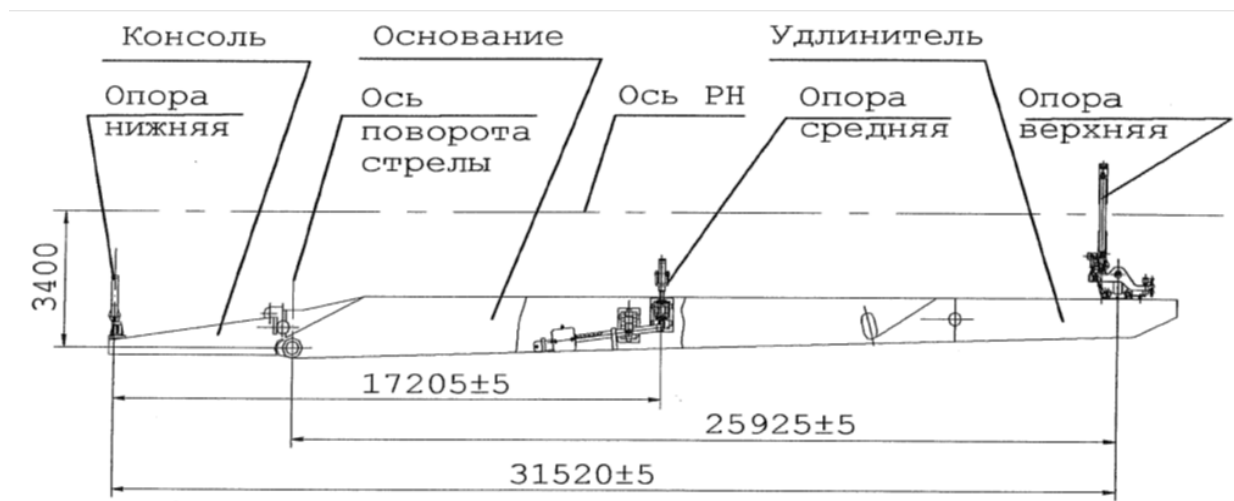


Рисунок 15 – Конструктивная схема стрелы ТУА с опорами для РН [14]

Основание стрелы выполнено в виде сварной металлоконструкции и состоит из двух боковых продольных балок и центральной балки. Боковые продольные балки соединены между собой поперечными балками и трубой. Основание стрелы шарнирно крепится к платформе агрегата пальцами. От продольных смещений пальцы удерживаются скобами, закрепленными на платформе болтами. Для крепления гидроцилиндра механизма подъема в балках вварены втулки, в которых крепится траверса гидроцилиндра. В балку вварены втулки для крепления механизма подвески и втулки для крепления удлинителя. Для установки средней опоры в основании стрелы предусмотрено отверстие.

Геометрическая модель основания стрелы, созданная в программном комплексе, приведена на рисунке 16. Внешняя стенка на рисунке не показана.

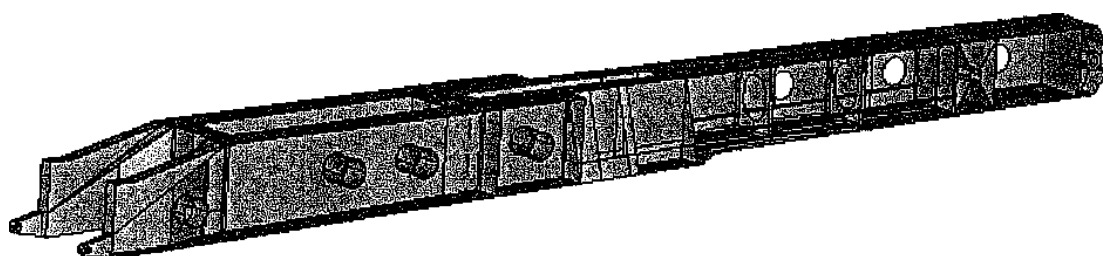


Рисунок 16 – Геометрическая модель основания стрелы [14]

Консоль выполнена в виде сварной металлоконструкции и состоит из двух продольных балок и двух поперечных балок. В продольные балки вварены опоры замков консоли.

Консоль шарнирно крепится к основанию стрелы двумя пальцами и запи-

рается относительно основания стрелы двумя замками. Каждый замок состоит из тяги, кривошипа, рычага, оси и ручного привода. Тяга одним концом входит в специальное гнездо основания стрелы. Другой конец тяги шарнирно соединен пальцем с кривошипом.

Геометрическая модель консоли стрелы, созданная в программном комплексе для расчёта методом конечных элементов, приведена на рисунке 17.

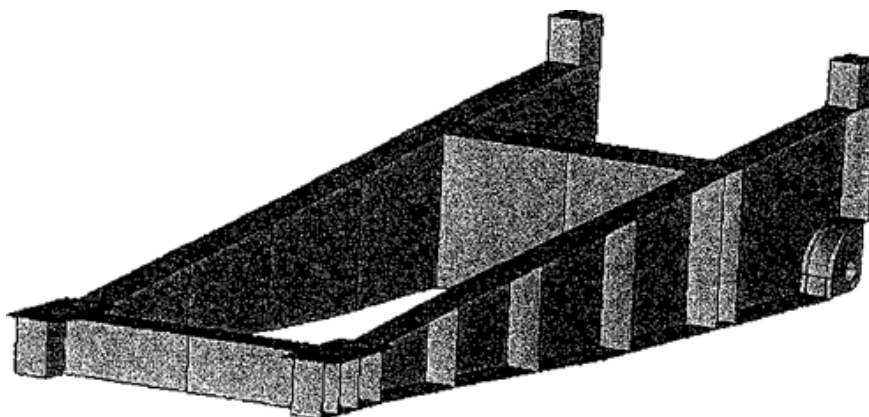


Рисунок 17 – Геометрическая модель консоли стрелы [14]

Внешняя стенка на рисунке условно не показана. Привод замка консоли представлен на рисунке 18.

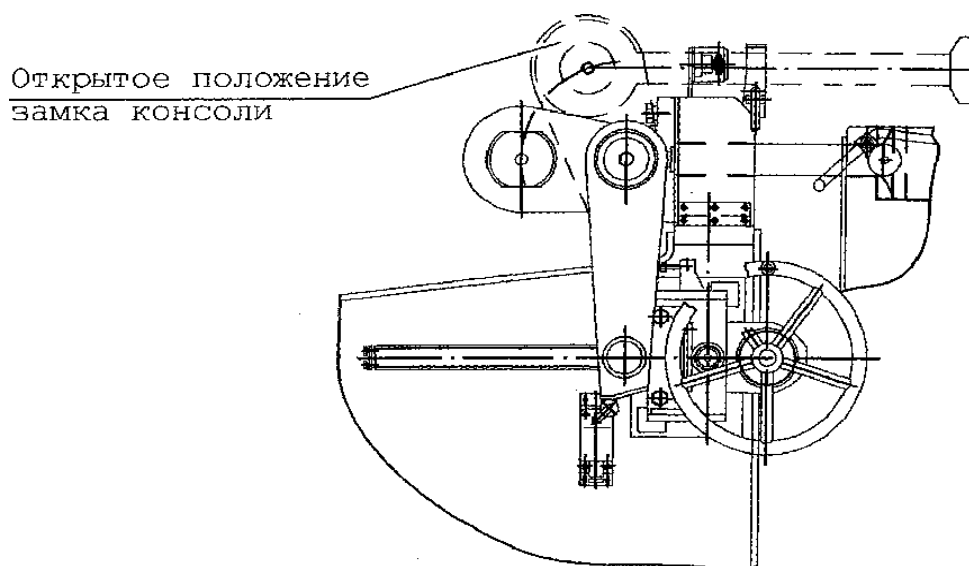


Рисунок 18 – Привод замка консоли [14]



Удлинитель является продолжением основания стрелы и предназначен для установки и крепления на нём верхней опоры. Удлинитель представляет собой сварную балку коробчатого сечения. Для крепления к основанию стрелы в удлинитель вварены проушины и втулки. Крепится удлинитель к основанию стрелы пальцами, осью и серьгами.

Геометрическая модель удлинителя стрелы, созданная в программном комплексе, приведена на рисунке 19. Внешняя стенка на рисунке условно не показана.

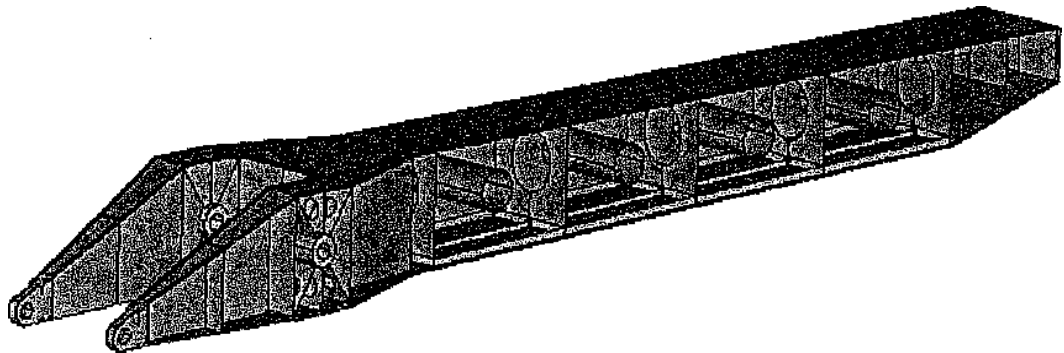


Рисунок 19 – Геометрическая модель удлинителя стрелы [14]

## 5.2 Материал конструкции стрелы

Материал основных деталей конструкции стрелы – сталь 10ХСНД с группой контроля IV. Данный материал обладает следующими характеристиками прочности:

- $\sigma_T = 4000 \text{ кгс/см}^2$ ;
- $\sigma_B = 5400 \text{ кгс/см}^2$ .

Допускаемые напряжения определяются в соответствии с ГОСТ В 17418-72. Прочность конструкции проверяется исходя из статической прочности.

Статическая прочность конструкции при работе в упругой области в соответствии с ГОСТ В 17418-72 должна обеспечиваться выполнением следующих условий:

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{K_{\text{сп}} * \sigma_T}{[n_{\text{сп}}]}; \quad \tau \leq [\tau] = \frac{K_{\text{сп}} * \sigma_T}{[n_{\text{сп}}]}, \quad (38)$$

где  $\sigma$  – расчетное нормальное или эквивалентное напряжение в элементе конструкции;

$\tau$  – расчетное касательное напряжение в элементе конструкции;

$[\sigma]$  и  $[\tau]$  – соответственно, допускаемые нормальное и касательное напряжения;

$\sigma_T$  – предел текучести материала при растяжении (сжатии);

$K_{сп}$  – коэффициент изменения предела текучести материала.

Величина коэффициента ограничивается условием:

$$K_{сп} \leq \frac{\sigma_B}{\sigma_T}, \quad (39)$$

где  $n_{сп}$  – суммарный минимально-допустимый коэффициент запаса статической прочности.

Он вычисляется по формуле (40):

$$n_{сп} = n_0 * n_{сп} , \quad (40)$$

где  $n_0 = 1, 1$  – коэффициент неучтенных факторов;

$n_{сп} = n_1 * n_2 * n_3$  – частный коэффициент запаса статической прочности;

$n_1$  – коэффициент, зависящий от вида расчетного сочетания нагрузок, предъявляемых к расчету и испытаниям, в частности при предельном нагружении  $n_1=1$ , а при рабочем для расчета несущих конструкций – 1,15;

$n_2$  – коэффициент, зависящий от отношения  $\frac{\sigma_B}{\sigma_T}$ , дополнительного запаса к разрушающей нагрузке:

$n_3$  – коэффициент, учитывающий характер контроля механических свойств материала.

Коэффициенты запаса и допускаемые напряжения для стали 10ХСНД при рабочем и предельном нагружении приведены соответственно в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Коэффициенты запаса и допускаемые напряжения для стали 10ХСНД при рабочем нагружении [14]

Рабочее нагружение		Значение
Коэффициент запаса	$n_0$	1,100
	$n_1$	1,000
	$n_2$	1,070
	$n_3$	1,000
	$n_E$	1,177
Допускаемое напряжение, кгс/см <sup>2</sup>	$n_{ЭКВ}$	3400
	$\tau$	2040

Таблица 3 – Коэффициенты запаса и допускаемые напряжения для стали 10ХСНД при предельном нагружении [1]

Предельное нагружение		Значение
Коэффициент запаса	$n_0$	1,100
	$n_1$	1,000
	$n_2$	1,070
	$n_3$	1,000
	$n_E$	1,177
Допускаемое напряжение, кгс/см <sup>2</sup>	$n_{ЭКВ}$	3400
	$\tau$	2040

### 5.3 Нагрузки

Рассматриваются два определяющих случая нагружения ТУА:

- начало подъёма стрелы с РН «СОЮЗ-2» этапов 1а, 1б при боковом ветре;
- конец подъёма стрелы с РН «СОЮЗ-2» этапов 1а, 1б при боковом ветре.

Напряжённое состояние стрелы ТУА в начале и в конце её подъёма определяется с помощью программного конечно-элементного комплекса.

Части конструкции, изготовленные из листовой стали, моделируются пластинчатыми элементами, проушины – объёмными элементами, рама и гидроцилиндр подъёма стрелы – стержневыми элементами.

Рама ТУА и гидроцилиндр подъёма стрелы моделируются как абсолютно жёсткие тела по отношению к стреле. Железнодорожные тележки, гидропоры и механизм доводки моделируются связями по соответствующим направлениям. Пальцы крепления консоли к основанию стрелы моделируются цилиндрическими шарнирами, что обеспечивает кинематическую связь с возможностью поворота консоли вокруг оси цилиндрического шарнира относительно основания стрелы. Замки запираания консоли моделируются двусторонними связями по оси  $y$ .

Крепление гидроцилиндра подъёма стрелы к раме ТУА и к стреле моделируется с помощью двух цилиндрических шарниров, не воспринимающих осевую нагрузку, что обеспечивает кинематическую связь с возможностью поворота стрелы вокруг осей шарниров без передачи изгибающего момента на гидроцилиндр.

Пальцы крепления удлинителя к стреле в коробе и серьгах, также моделируются с помощью цилиндрических шарниров. Невозможность поворота удлинителя относительно основания стрелы обеспечивается за счёт разнесённого расположения шарниров.

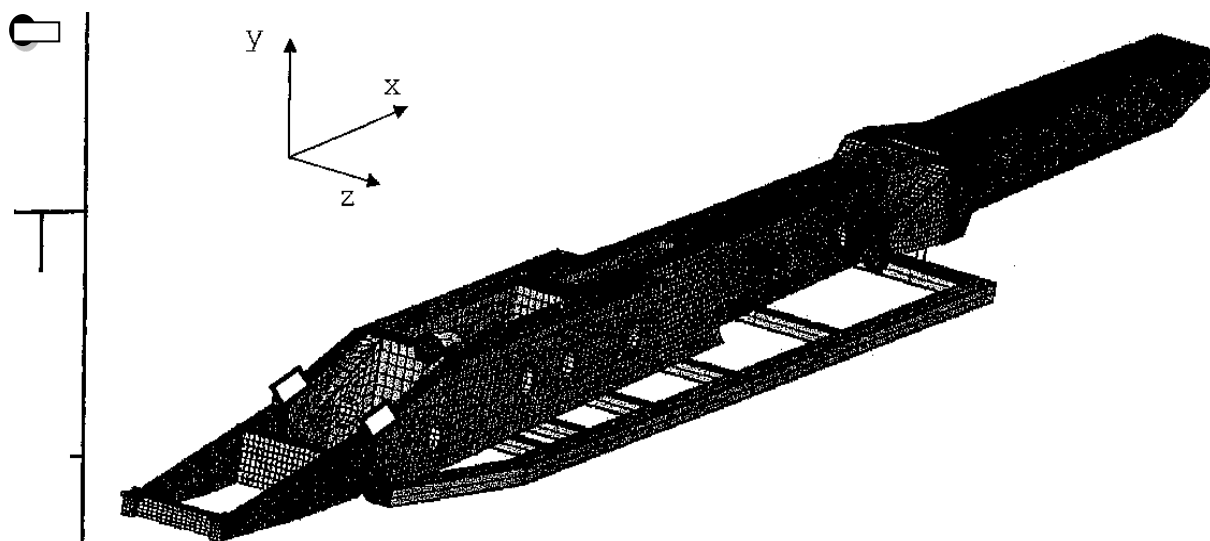


Рисунок 20 – Разбиение модели ТУА на конечные элементы [14]

Части конструкции, изготовленные из листовой стали, моделируются пластинчатыми элементами, проушины – объёмными элементами, рама и гид-

роцилиндр подъёма стрелы – стержневыми элементами.

Рама ТУА и гидроцилиндр подъёма стрелы моделируются как абсолютно жёсткие тела по отношению к стреле. Железнодорожные тележки, гидроопоры и механизм доводки моделируются связями по соответствующим направлениям.

Пальцы крепления консоли к основанию стрелы моделируются цилиндрическими шарнирами, что обеспечивает кинематическую связь с возможностью поворота консоли вокруг оси цилиндрического шарнира относительно основания стрелы. Замки запираания консоли моделируются двусторонними связями по оси  $u$ .

Крепление гидроцилиндра подъёма стрелы к раме ТУА и к стреле моделируется с помощью двух цилиндрических шарниров, не воспринимающих осевую нагрузку, что обеспечивает кинематическую связь с возможностью поворота стрелы вокруг осей шарниров без передачи изгибающего момента на гидроцилиндр.

Пальцы крепления удлинителя к стреле в коробе и серьгах, также моделируются с помощью цилиндрических шарниров. Невозможность поворота удлинителя относительно основания стрелы обеспечивается за счёт разнесённого расположения шарниров.

Также, рассмотрим первый расчётный случай нагружения ТУА – начало подъёма стрелы с изделием. Расчётная схема нагружения и закрепления стрелы в начале подъёма показана на рисунке 20.

Предполагается, что в начале подъёма на агрегат действуют:

- весовые нагрузки;
- ветровая нагрузка при боковом ветре;
- силы инерции.

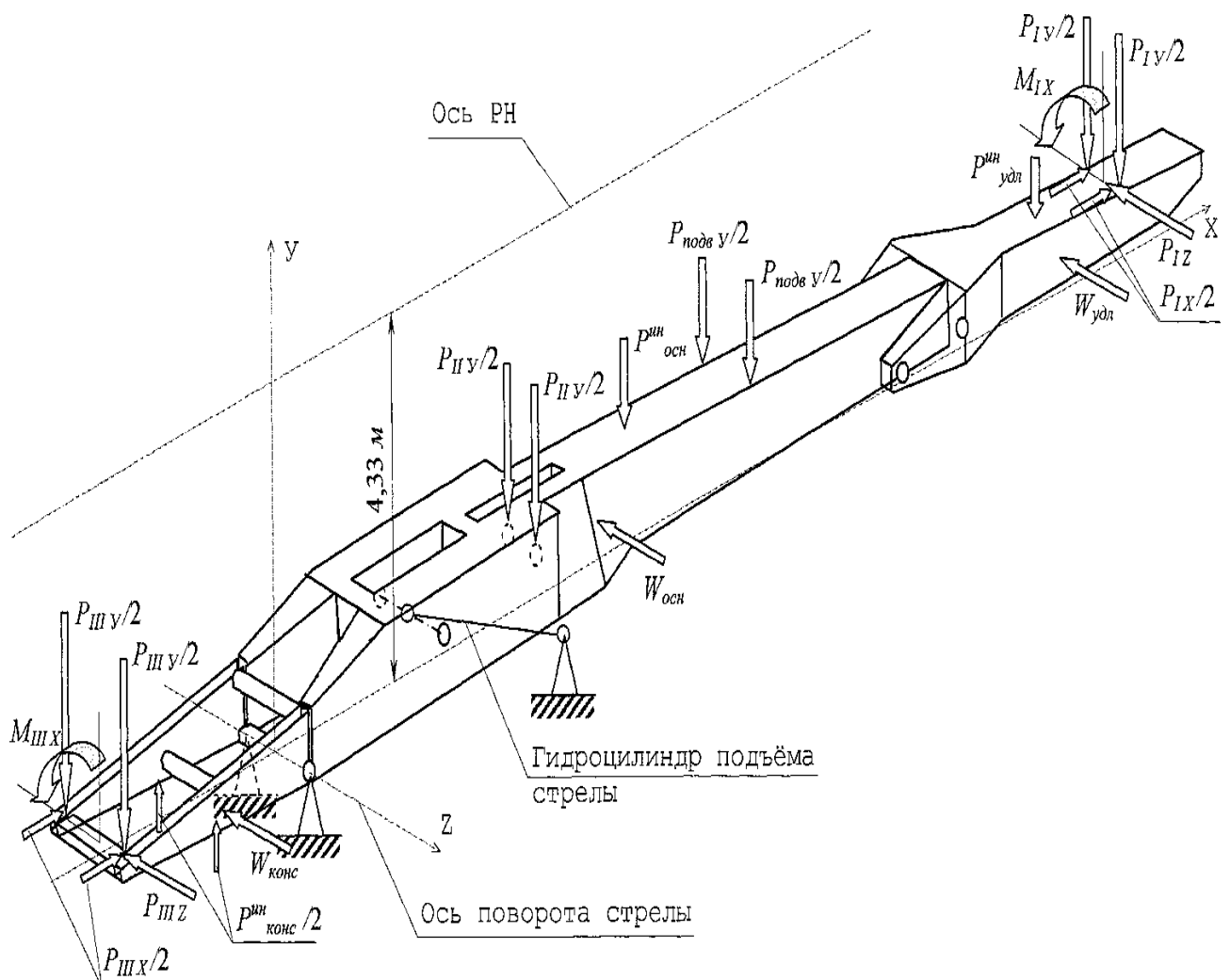


Рисунок 21 – Расчётная схема нагружения и закрепления стрелы в начале подъема [14]

Значения величин нагрузок и моментов, показанных на рисунке 21, составляют [1]:

– на места крепления нижней опоры к верху продольных балок консоли стрелы с координатами  $X_{III} = -5,44$  м и  $Y_{III} = 0,33$  м со стороны РН и самой опоры:

$$P_{IIIY} = P_{IIIY}^P + P_{IIIY}^{ИН} + G_4 + P_{4Y}^{ИН} = 14408 - 457 + 108 - 37 = 15000 \text{ КГС.} \quad (41)$$

$$P_{IIIx} = P_{IIIx}^{ИН} = 159 \text{ КГС.}$$

$$P_{IIIz} = P_{IIIz}^W = 1139 \text{ КГС.}$$

$$M_{III X} = P_{III Z}^W * (4,33 - Y_{III}) = 1139 * (4,33 - 0,33) = 4590 \text{ КГС} * \text{М}, \quad (42)$$

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

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

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

$M_{III X}$  – момент относительно оси X от ветровой нагрузки со стороны РН и самой опоры:

$$P_{II Y} = P_{II Y}^P + P_{II X}^{ИН} + G_8 + P_{8 Y}^{ИН} = 5900 + 149 + 1850 + 37 = 7936 \text{ кгс}, \quad (43)$$

где  $P_{II Y}^P = 5900 \text{ кгс}$  и  $P_{II Y}^{ИН} = 149 \text{ кгс}$  – весовая и инерционная нагрузки со стороны РН, воспринимаемые средней опорой соответственно настройке ее противовеса;

$G_8 = 1850 \text{ кгс}$  и  $P_{8 Y}^{ИН} = 37 \text{ кгс}$  – весовая и инерционная нагрузки со стороны средней опоры;

– на места крепления кронштейнов подвески к верхним углам центральной балки основания стрелы с координатами  $X_{\text{подв}} = 16,0 \text{ м}$  и  $Y_{\text{подв}} = 1,6 \text{ м}$  со стороны РН и самой опоры:

$$P_{\text{подв} Y} = G_9 = P_{9 Y}^{ИН} + G_{11} = 1085 + 22 + 265 = 1377 \text{ кгс}, \quad (44)$$

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

$G_{11} = 265 \text{ кгс}$  – весовая со стороны тяг подвески.

– на места крепления верхней опоры к верху балки удлинителя стрелы с координатами  $X_1 = 25,92 \text{ м}$  и  $Y_1 = 1,6 \text{ м}$  со стороны РН и самой опоры:

$$P_{I Y} = P_{I Y}^P + P_{I Y}^{ИН} + G_{10} + P_{10 Y}^{ИН} = 24530 \text{ кгс}. \quad (45)$$

$$P_{IX} = P_{IX}^{IH} = 210 \text{ кгс.}$$

$$P_{IZ} = P_{IZ}^W = 1050 \text{ кгс.}$$

$$M_{IX} = P_{IZ}^W * (4.33 - Y_I) = 1050 * (4.33 - 1, 6) = 2866,5 \text{ кгс*м,} \quad (46)$$

где  $P_{IY}^P = 18892$  кгс,  $P_{IY}^{IH} = 1352$  кгс и  $P_{IX}^{IH} = 210$  кгс – весовая и инерционные нагрузки со стороны РН.

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

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

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

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

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

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

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

– инерционные нагрузки на элементы металлоконструкции стрелы с координатами центров их приложения:

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

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

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

Нагрузки на стрелу, имеющие значения ниже 20 кгс, ввиду их относительной малости и с учётом погрешности их определения в [1], в расчёте не учитываются.

Собственный вес металлоконструкции стрелы в расчёте её прочности учитывается за счёт задания в модели разбиения стрелы на конечные элементы вектора ускорения свободного падения, направленного по оси Y вниз.

Рассмотрим второй расчётный случай нагружения ТУА – конец подъёма



стрелы с изделием при боковом ветре. Расчётная схема нагружения и закрепления стрелы в конце подъёма показана на рисунке 22.

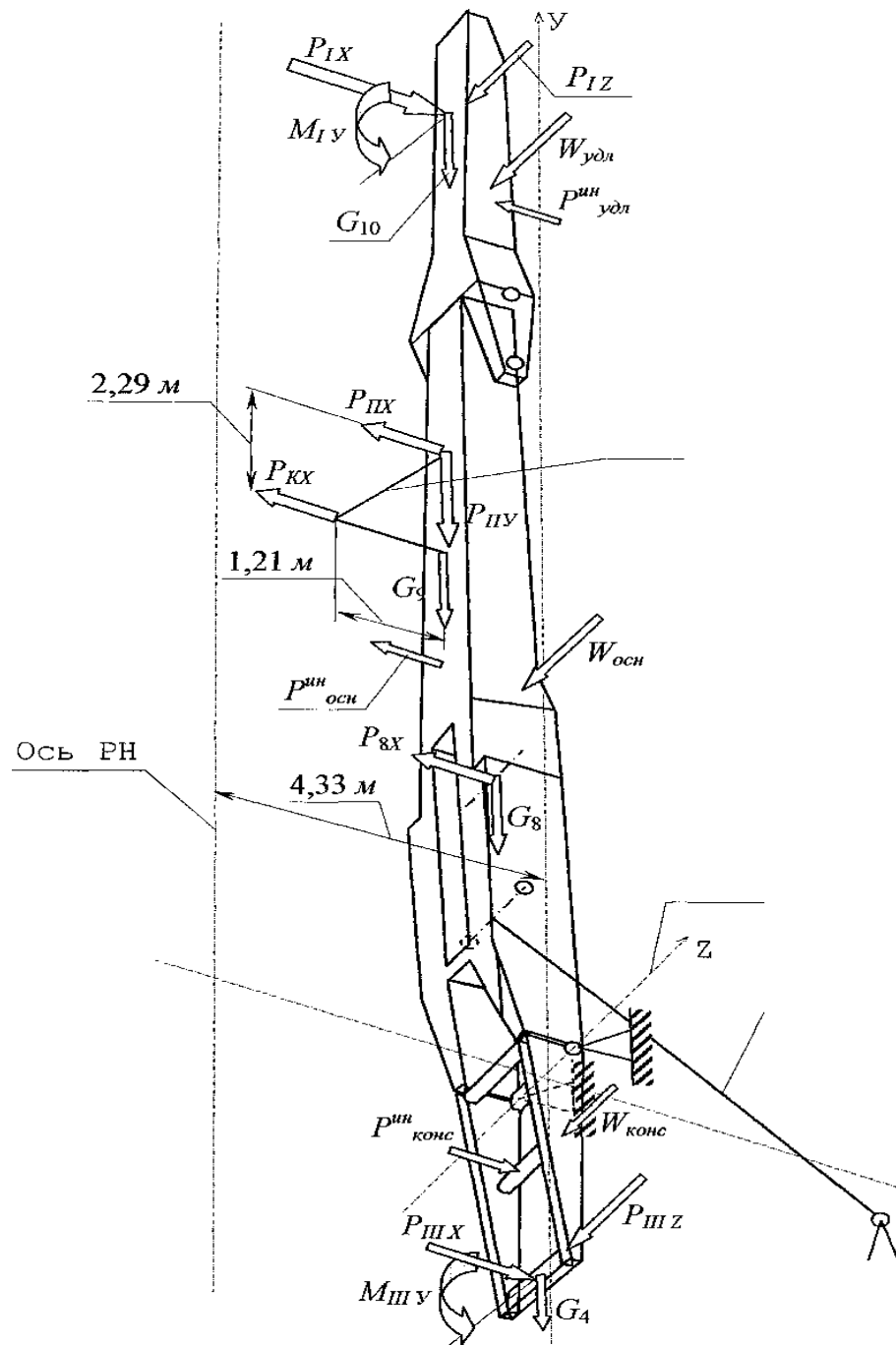


Рисунок 22 – Расчётная схема нагружения и закрепления стрелы в конце подъёма [14]

Значения величин нагрузок и моментов, показанных на рисунке 21, взятых и рассчитанных на основании приведенных данных, составляют:

– в зоне крепления верхней опоры к верху балки удлинителя стрелы с координатами  $X_j = -1,6$  м и  $Y_j = 25,92$  м со стороны РН и самой опоры:

$$P_{IX} = P_{IX}^P + P_{IX}^{IH} + P_{10X}^{IH} = 319 - 1220 - 258 = -1159 \text{ кгс.} \quad (47)$$

$$G_{10} = 4000 \text{ кгс.}$$

$$P_{IZ} = P_{IZ}^W = 1761 \text{ кгс.}$$

$$M_{IY} = P_{IZ}^W * (4,33 - Y_I) = 1761 * (4,33 - 1,6) = 4807,5 \text{ кгс*м,} \quad (48)$$

где  $P_{IX}^P = 319$  кгс,  $P_{IX}^{IH} = -1220$  кгс – весовая и инерционная нагрузки со стороны РН на верхнюю опору;

$G_{10} = 4000$  кгс и  $P_{10X}^{IH} = 258$  кгс – весовая и инерционная нагрузки со стороны верхней опоры;

$P_{IZ}^W = 1761$  кгс – ветровая нагрузка со стороны РН;

$M_{IY}$  – момент относительно оси  $Y$  от ветровой нагрузки со стороны РН;

– в зоне крепления подкосов кронштейнов подвески на центральной балке основания стрелы с координатами  $X_I = -1,6$  м и  $Y_I = 20,75$  м со стороны подкосов, передающих нагрузку от РН:

$$P_{IY} = P_{KY}^P + P_{KY}^{IH} + G_{11} = 39200 + 315 + 265 = 39780 \text{ кгс.} \quad (49)$$

$$P_{IX} = P_{IY} * \frac{1,21}{2,29} = 39780 * \frac{1,21}{2,29} = 21020 \text{ кгс,} \quad (50)$$

где  $P_{KY}^P = 39200$  кгс и  $P_{KY}^{IH} = 315$  кгс - весовая и инерционная нагрузки со стороны РН;

$G_{11} = 265$  кгс – вес элементов подвески;

– в зоне крепления кронштейнов подвески на центральной балке основания стрелы с координатами  $X_{\text{подв}} = -1,6$  м и  $Y_{\text{подв}} = 18,46$  м со стороны подве-

сок РН и самих кронштейнов:

$$P_{KX} = P_{KX}^P + P_{KX}^{ИН} + P_{9X}^{ИН} - P_{ПХ} = 3082 + 25 + 35 - 21020 = -17878 \text{ кгс.} \quad (51)$$

где  $P_{KX}^P = 3082$  кгс и  $P_{KX}^{ИН} = 25$  кгс – весовая и инерционная нагрузки со стороны РН;

$G_9 = 1085$  кгс и  $P_{9X}^{ИН} = 35$  кгс - весовая и инерционная нагрузки со стороны элементов подвески;

– на места крепления средней опоры к внутренним бокам продольных балок основания стрелы с координатами  $X_{III} = -0.3$  м и  $Y_{III} = -5.44$  м со стороны РН и самой опоры:

$$P_{IIIХ} = P_{IIIХ}^P + P_{IIIХ}^{ИН} + P_{4Х}^{ИН} = 2763 + 355 + 277 = 3145 \text{ кгс.} \quad (52)$$

$$G_4 = 1080 \text{ кгс.}$$

$$P_{IIIZ} = P_{IIIZ}^P = 609 \text{ кгс.}$$

$$M_{IIIY} = P_{IIIZ}^W * (4.33 - X_{III}) = 609 * (4.33 - 0.3) = 2454 \text{ кгс*м,} \quad (53)$$

где  $P_{IIIХ}^P = 2763$  кгс и  $P_{IIIХ}^{ИН} = 355$  кгс – весовая и инерционная нагрузка со стороны РН;

$G_4 = 1080$  кгс и  $P_{4Х}^{ИН} = 27$  кгс – весовая и инерционная нагрузки со стороны нижней опоры;

$$P_{IIIZ}^W = 609 \text{ кгс - ветровая нагрузка со стороны РН;}$$

$M_{IIIY} = 609$  кгс - момент относительно оси Y от ветровой нагрузки со стороны РН;

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

$$W_{конс} = 53 \text{ кгс, } X = -0.32 \text{ м, } Y = -1.12 \text{ м – на консоль;}$$

$$W_{осн} = 829 \text{ кгс, } X = -0.81 \text{ м, } Y = 9.82 \text{ м – на основание;}$$

$W_{удл} = 340$  кгс,  $X = -1,21$  м,  $Y = 25,80$  м – на удлинитель;

– инерционные нагрузки на элементы металлоконструкции стрелы с координатами центров их приложения:

$P_{конс}^{ИН} = 10$  кгс,  $X = -0,35$  м,  $Y = -1,92$  м - на консоль;

$P_{осн}^{ИН} = 4\,95$  кгс,  $X = -0,80$  м,  $Y = 8,70$  м - на основание;

$P_{осн}^{ИН} = 456$  кгс,  $X = -1,04$  м,  $Y = 28,0$  м - на удлинитель.

#### 5.4 Результаты расчёта

Расчёт проводится с помощью программного комплекса Solidworks Simulation. Полученное в результате расчёта общее распределение эквивалентных напряжений в стреле в начале её подъёма с РН, соответствующее показанной на рисунке 20 схеме нагружения, приведено на рисунке 23.

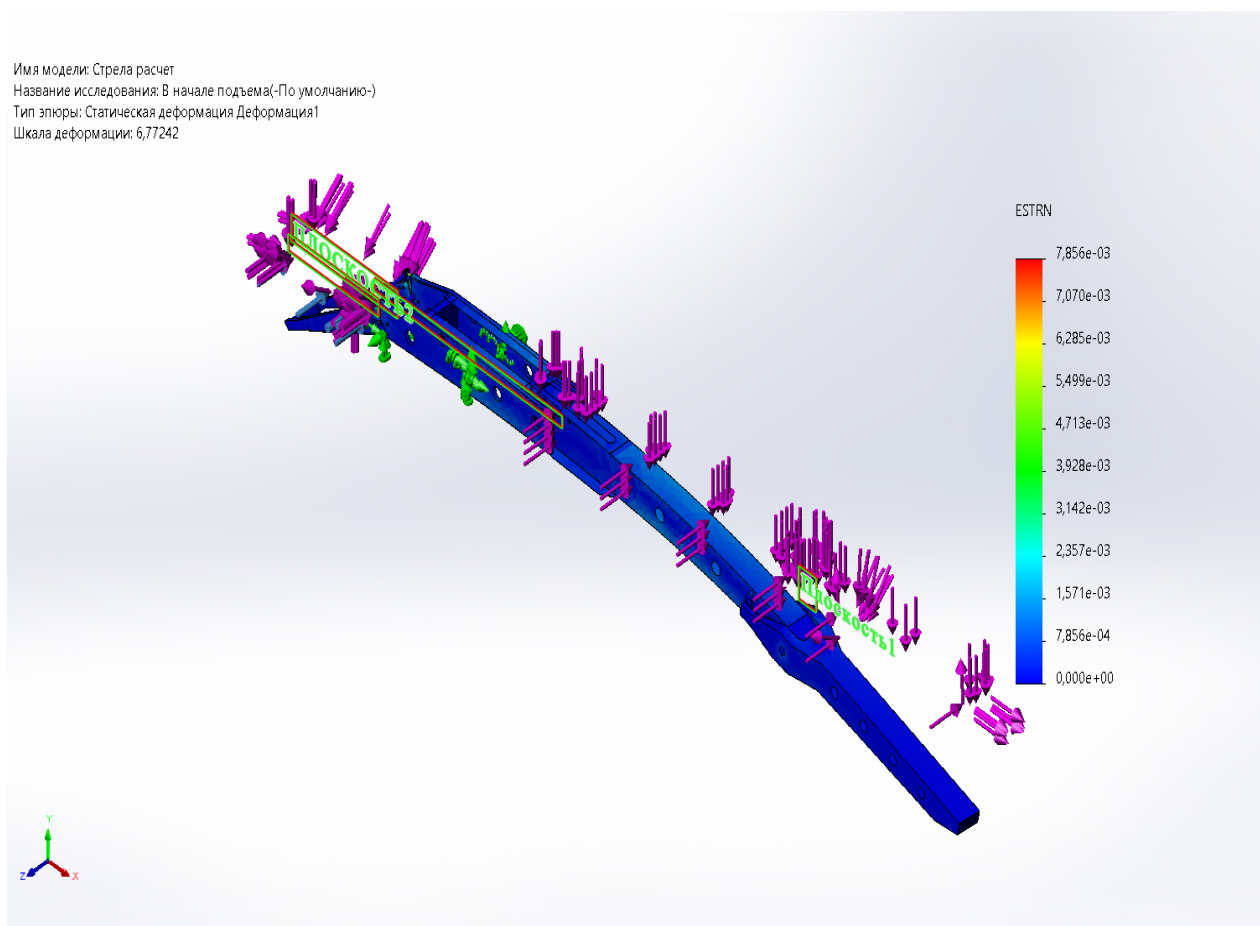


Рисунок 22 – Деформация стрелы в начале её подъёма с РН.

Как видно из рисунка 24, эквивалентные напряжения в элементах конструкции в основном не превышают 2000 МПа (2040 кгс/см<sup>2</sup>).

Имя модели: Стрела расчет  
Название исследования: В конце подъема(-По умолчанию-)  
Тип эпоры: Статическая деформация Деформация1  
Шкала деформации: 9,43802

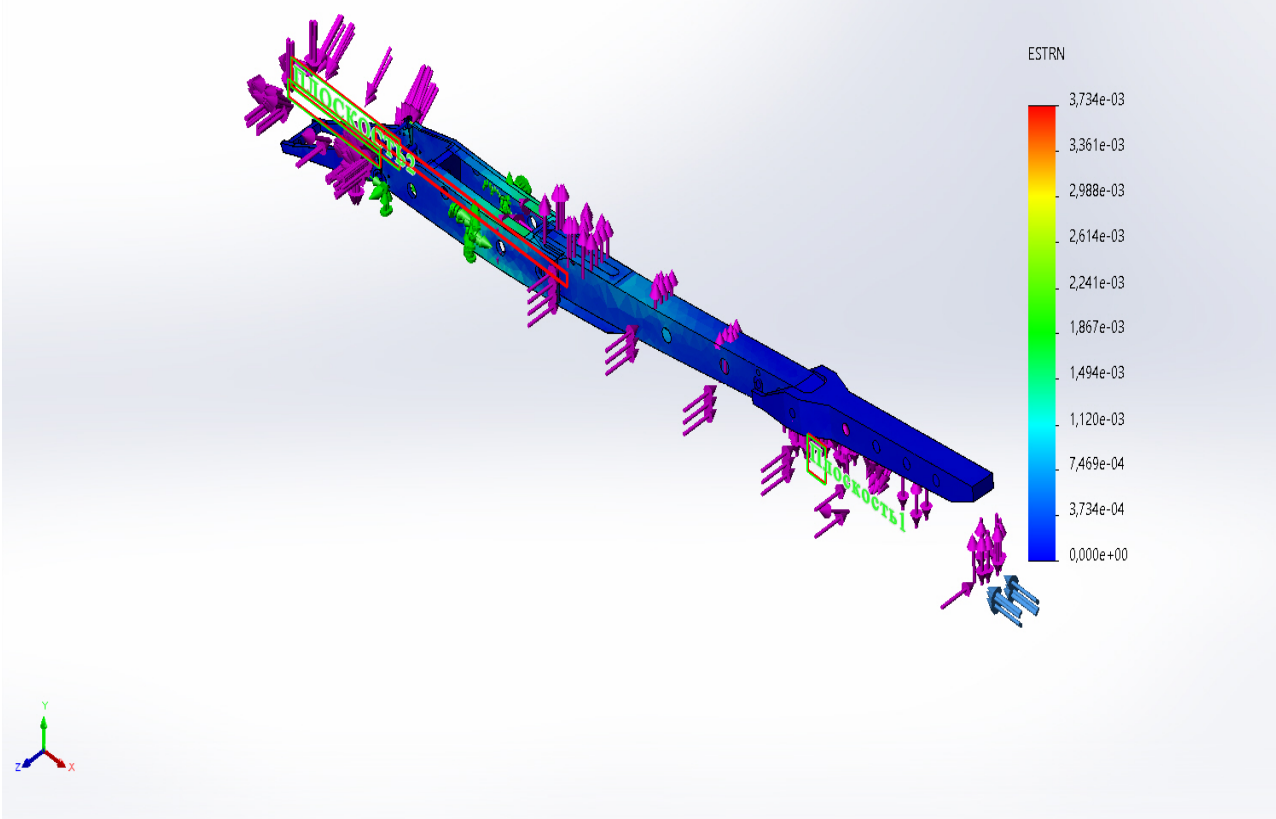


Рисунок 24 – Деформация стрелы в конце её подъёма.

Распределение эквивалентных напряжений в основании стрелы, показывает, что зона основания стрелы является более нагруженной. Максимальные эквивалентные напряжения действуют:

- в деталях консоли в зоне установки замка и пальцев оси поворота стрелы-  $2450 \text{ кгс/см}^2$ ;
- в боковых листах продольных балок основании стрелы в зоне втулок крепления траверсы гидроцилиндра  $2450 \text{ кгс/см}^2$ ;
- в листах продольных балок основания стрелы в зоне его крепления с консолью -  $2450 \text{ кгс/см}^2$ ;
- в листах металлоконструкции основания в зоне установки средней опоры -  $2245 \text{ кгс/см}^2$ ;
- в серьгах крепления удлинителя к основанию стрелы –  $2245 \text{ кгс/см}^2$ .

Расчёт конца подъёма проводится с помощью программного комплекса Solidworks Simulation. Полученное в результате расчёта общее распределение эквивалентных напряжений в стреле в конце её подъёма с РН, соответствующее показанной на рисунке 23.

Эквивалентные напряжения в элементах конструкции в основном не превышают 60 МПа (612 кгс/см<sup>2</sup>).

Более высокие напряжения до 1938 кгс/см<sup>2</sup>, возникают в зонах установки замков на консоли, пальцев оси поворота стрелы и втулок крепления траверсы гидроцилиндра в основании.

Максимальные эквивалентные напряжения действуют:

- в деталях консоли в зоне установки замка и пальцев оси поворота стрелы - 1428 кгс/см<sup>2</sup>;
- в боковых листах продольных балок основания стрелы в зоне втулок крепления траверсы гидроцилиндра 1938 кгс/см<sup>2</sup>;
- в листах продольных балок основания стрелы в зоне его крепления с консолью – 1632 кгс/см<sup>2</sup>,
- в листах металлоконструкции основания в зоне установки средней опоры – 1632 кгс/см<sup>2</sup>;
- в серьгах крепления удлинителя к основанию стрелы – 1632 кгс/см<sup>2</sup>.

Таким образом, основание стрелы испытывает самую большую нагрузку и деформацию.

Сборочные чертежи основания стрелы с указанием всех сварных швов представлены в графической части.

## 6 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТУА

### 6.1 Вероятность безотказной работы сварочных соединений

ВБР сварочных соединений представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Вероятность работоспособности и потери работоспособности сварных соединений. [13]

Тип соединения	Вероятность потери работоспособности P	Вероятность работоспособности P, %
Стыковое одностороннее без скоса кромок С2	$0,2 \cdot 10^{-5}$	99,999998
Стыковое одностороннее со скосом одной кромки С8	$0,2 \cdot 10^{-5}$	99,999998
Стыковое одностороннее со скосом кромок С17	$0,1 \cdot 10^{-3}$	99,999999
Нахлесточное одностороннее без скоса кромок Н1	$0,1 \cdot 10^{-3}$	99,999999
Тавровое одностороннее без скоса кромок Т1	$0,7 \cdot 10^{-5}$	99,999993
Тавровое одностороннее со скосом одной кромки Т6	$0,7 \cdot 10^{-5}$	99,999993

### 6.2 Расчет вероятности безотказной работы основания стрелы

Для расчёта ВБР стрелы транспортно-установочного агрегата с учетом вероятности безотказной работы всех сварных швов мы воспользуемся таблицей 5.

Формула вероятности безотказной работы:

$$P = p(C2) \times p(C8) \times p(C17) \times p(C17) \times p(H1) \times p(H1) \times p(H1) \times p(H1) \times p(H1) \times p(H1) \times p(H1) \times p(H1) \times p(H1) \times p(H1) \times p(T1) \times p(T1) \times$$

$$\begin{aligned}
& \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times \\
& \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times \dots \dots \dots (54) \\
& \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times \\
& \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times \\
& \times p(T1) \times p(T1) \times p(T1) \times p(T6)
\end{aligned}$$

$$P = 96,666662\%$$



## 7 РАЗДЕЛ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

### 7.1 Общие правила по мерам безопасности

Руководитель и обслуживающий его персонал обязаны изучить устройство, принципы эксплуатации и правила технического обслуживания ТУА, пройти экзамены квалификационной комиссии и получить удостоверение.

Руководитель и обслуживающий его персонал должны быть аттестованы в области промышленной безопасности в установленном порядке.

Обслуживающий персонал электротехнической специальности должен пройти аттестацию и получить удостоверение в соответствии с «Правилами и мерами безопасности при эксплуатации электроустановок» ПТЭЭП-2003.

*Персонал, обслуживающий агрегат, обязан:*

- пройти мед. освидетельствование с целью установления соответствия физиологического состояния установленным условиям для специалиста;
- во время работы на ТУА иметь при себе удостоверение на право работы на агрегате;
- строго соблюдать настоящие указания мер безопасности и правила, изложенные в инструкциях по охране труда, технике безопасности эксплуатирующей организации;
- знать требования безопасной эксплуатации согласно приказу МО РФ № 214 от 26.06.95 (РТБ-95);
- знать требования «Правил и мер безопасности при эксплуатации электроустановок» ПТЭЭП - 2003;
- знать правила техники безопасности при работе с гидросистемой;
- уметь практически использовать э и обслуживать агрегат в соответствии с условиями документации;
- немедленно подавать команду «Стоп» и докладывать руководителю персонала обо всех неисправностях оборудования или нарушениях правил безопасной эксплуатации. Команда «Стоп» выполняется независимо от того, кем она подана;

- знать места расположения медицинских аптек и средств защиты, места укрытий, порядок эвакуации и метод ликвидации аварийных ситуаций;
- соблюдать осторожность во время работы на агрегате для того, чтобы предотвратить возможные повреждения изделия;
- иметь страховочные пояса и пристегиваться ими за металлоконструкции при работе на высоте;
- носить специальную защитную каску для защиты головы от травм в случае падения сверху каких-либо предметов;
- носить инструмент и принадлежности в сумке для исключения случайных падений предметов на работающих внизу;
- уметь оказать первую медицинскую помощь при травмах, ожогах, при поражении обслуживающего персонала электрическим током и токсичными веществами;
- помнить, что от дисциплинированности и осторожности на работе во многом зависит собственная безопасность и безопасность других.

Необходимо помнить, что срочность выполнения работ не является основанием для нарушения мер безопасности.

*Обслуживающему персоналу при работе на ТУА запрещается:*

- приступать к работе на неисправном или не прошедшем очередное техническое освидетельствование ТУА;
- применять неисправное оборудование и оборудование с истекшим сроком очередного освидетельствования;
- выполнять какие-либо операции без команды руководителя персонала или руководителя работ;
- покидать рабочее место без разрешения руководителя персонала или руководителя работ;
- находиться на рельсовом пути во время движения ТУА;
- поднимать агрегат на гидроопорах, не установив в рабочее положение механизм доводки;
- вывешивать агрегат на гидроопорах с разностью высот более 100 мм

по указателям высоты подъема;

- поднимать стрелу с изделием, не вывесив агрегат на гидроопорах, не расфиксировав винтовыми упорами ложемент нижней опоры и не вывинтив из изделия резьбовые штыри нижней опоры;

- поднимать стрелу при не откинутых в походное положение и не закрепленных в этом положении площадках средней опоры;

- поднимать стрелу без изделия, не вывесив агрегат на гидроопорах при подъеме стрелы на угол больше 18;

- полностью разводить рычаги захвата при вертикальном положении стрелы с изделием до полной передачи веса изделия на стартовую систему 373ПУ07;

- подключать силовой кабель к колонке питания, не отключив напряжение на колонке питания;

- находиться на стреле или платформе при подъеме стрелы;

- транспортировать агрегат, заторможенный ручным тормозом;

- транспортировать агрегат тепловозом со скоростью свыше 10 км/ч;

- транспортировать тепловозом агрегат с включенными редукторами тележек;

- включать или выключать редукторы самоходных тележек при движении ТУА. Переключение производится только после полной остановки ТУА;

- соединять или разъединять рукава тормозной системы до полной остановки ТУА;

- производить ремонт электрооборудования, находящегося под напряжением;

- производить ремонт гидросистемы, находящейся под давлением;

- находиться под поднимаемыми или опускаемыми грузами, вблизи натянутых тросов и их крепления, стоять под краном во время его работы.

При обнаружении пробоев изоляции или появлении напряжения на корпусах электрооборудования и металлоконструкции ТУА последний немедленно отключить от сети и до устранения неисправности работ с ТУА не производить.

При обнаружении течи масла в гидросистеме работ с ТУА не производить до устранения неисправности.

Перед подъемом или опусканием стрелы и передвижением ТУА самоходом необходимо подавать сигнал ревуном.

При транспортировании ТУА с изделием и без изделия тепловоз может находиться спереди или сзади ТУА.

Руководителю персонала лично проверять выполнение всех операций по закреплению и раскреплению изделия на ТУА.

## **7.2 Меры пожарной безопасности**

*Обслуживающий персонал ТУА обязан:*

- знать противопожарные инструкции и уметь пользоваться средствами пожаротушения;

- использованный обтирочный материал в процессе работы собирать и выносить в специально отведенное место;

- содержать средства пожаротушения в постоянной готовности к работе;

- содержать в исправности заземление электрооборудования;

- до установки изделия произвести тщательную уборку на ТУА, обращая особое внимание на отсутствие пролива рабочей жидкости из гидросистемы;

- в случае возникновения на ТУА пожара или обстоятельств, ведущих к пожару, немедленно отключить напряжение электросети и приступить к его тушению имеющимися средствами пожаротушения, удалить с ТУА людей и сообщить пожарной охране объекта.

*Обслуживающему персоналу запрещается:*

- курить на агрегате;

- хранить на ТУА горючие и легковоспламеняющиеся жидкости и материалы. Хранение их должно производиться вне ТУА в специально отведенном месте;

- загромождать проходы, трапы. На ТУА должно находиться только штатное оборудование и в установленных местах.

Для ликвидации загорания или пожара из состава обслуживающего персонала

ТУА должен быть составлен пожарный расчет с распределением обязанностей.

### 7.3 Меры взрывобезопасности

Основным требованием по мерам безопасности при работе ТУА с изделием является строгое соблюдение обслуживающим персоналом всех норм, правил и указаний безопасности, изложенных в настоящей инструкции, а также в специальных инструкциях на объекте.

При проведении штатных работ обслуживающему *персоналу запрещается*:

- курить, а также носить с собой зажигалки и спички;
- во избежание образования электрической искры открывать створки шкафов, проводить осмотры и подключение электрооборудования, находящегося под напряжением;
- производить работу, при которой возможно возникновение искры;
- применять одежду, приспособления и материалы из синтетических тканей (нейлон, перлон и т.п.), а также изделия из материалов, на которых накапливаются заряды статического электричества (кольца, броши, браслеты и т.п.);
- применять обувь и одежду, вызывающую искрообразование.

Необходимо помнить, что только при условии строгого соблюдения и выполнения всех требований и указаний, изложенных в настоящем разделе, гарантируется безопасность обслуживающего персонала при эксплуатации и работе на ТУА.

## 8 РАЗДЕЛ ЭКОНОМИКИ

Экономическая рентабельность транспортно-установочного агрегата имеет прямую зависимость от технических параметров, надежности и времени эксплуатации. Такая связь обусловлена тем, что ТУА используется для транспортировки ракеты космического назначения к пусковой установочной системе, применяется для установки или снятия изделия, такой вид эксплуатации не должен требовать частых издержек по эксплуатации, требовать дополнительных технических средств в процессе обслуживания.

Для повышения надежности и достаточной работоспособности необходимо проведение анализа экономической рентабельности. При оценке следует учитывать издержки и затраты длительного периода эксплуатации. Учёт фактора времени позволит получить наиболее объективные и точные данные.

Оценка качества ТУА предполагает оценку экономического эффекта эксплуатации ТУА с учетом общих затрат и объема работ, выполненного агрегатом за период эксплуатации или рассчитанный (эксплуатационная производительность):

$$\mathcal{E} = Z_{\text{общ}} / V_{\text{общ}}, \quad (60)$$

где  $Z_{\text{общ}}$  – общие затраты;

$V_{\text{общ}}$  – эксплуатационная производительность.

Общие затраты составляют затраты на приобретение ТУА  $Z_{\text{п}}$ , затраты на транспортирование машины  $Z_{\text{т}}$ , таможенные затраты (для машин зарубежного производства)  $Z_{\text{р}}$  и эксплуатационные затраты  $Z_{\text{э}}$ :

$$Z_{\text{общ}} = Z_{\text{п}} + Z_{\text{т}} + Z_{\text{р}} + Z_{\text{э}}. \quad (61)$$

В эксплуатационные затраты входят: затраты на топливо (электроэнергию)  $Z_{\text{т(э)}}$ , затраты на смазочные материалы и технические жидкости  $Z_{\text{с.м.т}}$ , затра-

ты на производство технических обслуживаний и ремонтов (с учетом затрат на обучение обслуживающего и ремонтного персонала)  $Z_{ТОиР}$ , затраты на запасные части  $Z_{з.ч.}$ , затраты на строительство и содержание транспортных коммуникаций  $Z_{т.к.}$  и заработная плата операторов и ремонтного персонала  $Z_{з.п.}$ :

$$Z_{э} = Z_{т(э)} + Z_{с.м} + Z_{ТОиР} + Z_{з.ч.} + Z_{р.п} + Z_{т.к.} + Z_{з.п.} \quad (62)$$

Общий объем работ, выполненный агрегатом за период эксплуатации, определяется по годовой эксплуатационной производительности  $\Pi_{г.эксп}$  принимаемой по данным предприятий данного региона или рассчитывается с учетом погодных-климатических условий региона, а так же особенностей организации работ на предприятии и времени эксплуатации машины  $n$ :

$$V_{общ} = \Pi_{г.эксп} \times n. \quad (63)$$

В результате проведенного расчета в пункте 4.6 настоящей работы получены следующие значения показателей надежности ТУА:

– вероятность безотказной работы ТУА при выполнении операций штатного цикла составляет  $P(t_u) = 0,9936$ ;

– среднее время восстановления работоспособности ТУА силами эксплуатирующего персонала, без учета времени доставки оборудования из ЗИП составляет  $T_e = 0,82$  ч.;

– минимальный объем, необходимый для подтверждения нижнего значения вероятности безотказной работы, равного 0,95 с доверительной вероятностью 0,9, составляет 45 циклов.

Средняя цена на дизельное топливо 50 рублей за литр. Таможенные затраты отсутствуют, поскольку ТУА отечественного производства.

Для примера расчета используем условные цифры, в усл.ед., результаты представим в таблице 5.

Таблица 5 – Оценка экономического эффекта эксплуатации транспортно-устновочного агрегата

Показатель	Обозначение	Условная сумма (усл.ед.)	Доля затрат в общей сумме, %
1. Экономический эффект (2/3)	Э	98,85	-
2. Общий объем работ (14*15)	V <sub>общ</sub>	44,712	-
3. Общие затраты (4+5+6+7)	Z <sub>общ</sub>	4420	100
4. Затраты на приобрете- ние:	Z <sub>п</sub>	2800	63,35
5. Затраты на транспорти- рование машины	Z <sub>т</sub>	150	3,39
6. Таможенные затраты (для машин зарубежного производства)	Z <sub>т</sub>	0	0,00
7. Эксплуатационные за- траты, в том чис- ле:(8+9+10+11+12+13)	Z <sub>э</sub>	1470	33,26
8. Затраты на топливо (электроэнергию)	Z <sub>т(э)</sub>	450	10,18
9. Затраты на смазочные материалы и технические жидкости	Z <sub>с.м.т</sub>	120	2,71
10. Затраты на производ- ство технических обслужи- ваний и ремонтов (с учетом затрат на обучение обслу- живающего и ремонтного персонала, в том числе и страховые взносы, 30%)	Z <sub>ТОиР</sub>	350	7,92
11. Затраты на запасные ча- сти	Z <sub>з.ч</sub>	220	4,98
12. Затраты на строитель- ство и содержание транс- портных коммуникаций	Z <sub>т.к</sub>	80	1,81



13. Заработная плата персонала	Зз.п	250	5,66
14. Эксплуатационной производительности	Пг.эксп	0,9936	-
15. Времени эксплуатации машины, циклы	n	45	-

Итак, затраты на приобретение ТУА будут составлять 63,35%, это только на начальном этапе, первостепенные вложения. Остальную же часть затрат, а именно 33,26% займут эксплуатационные затраты, поэтому одна треть затрат, с учетом повышения надежности и долговечности в сумме и учитывая разновременные издержки, затраты целесообразны и эффективны.

Для наглядности, представим долю каждой статьи затрат в общей сумме расходов, % на рисунке 24.



Рисунок 25 – Доля каждой статьи затрат в общей сумме расходов, %

Таким образом, с помощью приведенных расчетов можно определить, что приведенные затраты на повышение надежности и работоспособности ТУА целесообразны.

Исходя из того, что основная цель данной работы заключается в проведении оценки надежности металлической конструкции транспортно-установочного агрегата с учетом сварочных дефектов присутствующих в сварных соединениях, где согласно пункту 6 данной работы вероятности безотказной работы сварочных соединений составила  $P = 96,666662\%$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был изучен транспортно-установочный агрегат, а также, была изучена теория надежности и работоспособности и методы ультразвукового неразрушающего контроля. Проведен анализ надежности одной из систем транспортно-установочного агрегата, также была спрогнозирована вероятность безотказной работы с учетом вероятности безотказной работы сварных швов. Помимо этого, была рассмотрена экономическая и БЖД часть. В ходе прогнозирования надежности ТУА стало ясно, что, если учитывать вероятность безотказной работы каждого сварного шва данной конструкции, вероятность безотказной работы ТУА снижается на 0, 027, следовательно, можно предположить, что это влияет на надежность и работоспособность ТУА, в долгосрочной перспективе на эксплуатацию ТУА. Также, можно отметить, что затраты на прогнозирование надежности в разы меньше, чем затраты на ремонт или замену систем ТУА в случае возникновения аварии, поэтому исследования, проведенные в работе, доказывают свою актуальность и целесообразность.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение технологии поддержки принятия решений на различных этапах жизненного цикла космических средств в составе системы информации о техническом состоянии и надёжности / П. Н. Автамонов, А.Д. Бахмут, А.В. Крылов, М.Ю. Охтилев // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2017. – Т. 16. – № 3. – С. 173-184.
2. Андреев, А. В. Теоретические основы надёжности технических систем: учеб. Пособие / А. В. Андреев, В. В. Яковлев, Т. Ю. Короткая. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 164 с.
3. Абрамов, А. Н. Эксплуатационная надёжность технических систем: учеб. пособие / А.Н. Абрамов. – М. : МАДИ, 2019. – 120 с.
4. Воробьев, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин / В. Е. Воробьев, В. Я. Кучер. – СПб. : СЗТУ, 2004. – 56 с.
5. Гнеденко, Б. В, Математические основы в теории надёжности / Б. В. Гнеденко. – М. : Наука, 1965. – 157 с.
6. ГОСТ Р 53802-2010. Системы и комплексы космические ; - введ. 2011-07-01. – Москва : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии ; М. : Стандартинформ, 2019.
7. ГОСТ Р 56542-2019. ГОСТ Р 56542-2019 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов ; введ. 2020-11-01. – М. : Стандартинформ, 2019.
8. ГОСТ 18353-79. Контроль неразрушающий. Методы. Сборник стандартов – Взамен ГОСТ 18353-73 ; введ. 1980-07-01. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2005.
9. ГОСТ 23829-85. Контроль неразрушающий акустический. Сборник стандартов. Взамен ГОСТ 23829-79; введ. 1987 -01-01. М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1990.
10. Зацепин, А. Ф. Акустический контроль: учебное пособие / А. Ф. Зацепин, В. Е. Щербинина. – Екатеринбург : Урал, 2016. – 211 с.

11. Заятров, А. В. Комплексная оценка качества и надёжности электрооборудования легкового автомобиля: дис. ... канд. технических наук : 05.09.03 / Заятров А. В. ; СГТУ. – Тольятти, 2013. – 186 с.
12. Золотов, А. А. Методы прогнозирования и обеспечения надёжности КА / А. А. Золотов. – М. : Изд-во МАИ, 2012. – 124 с.
13. Коновалов, Н. Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля: дис.....канд. техн. наук: 1.02.06/ Н. Н. Коновалов; Москва ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность» 2006 – 75 с.
14. Кондаков В. И. Транспортно-установочный агрегат 373УН34. Расчет на прочность 373УН34.0000.000Р14 / В. И. Кондаков. – М, 2013 – 323 с.
15. Ляпин, М. И. Транспортно-установочный агрегат 373УН34. Расчет надёжности 373УН34.0000.000Р12 / М. И. Ляпин, В. И. Сажин-Шаховской. – М, 2014. – 45 с.
16. Малозёмов, Б. В. Оценка надёжности и прогнозирование работоспособности систем электрического транспорта (на примере троллейбуса): дис. ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Б. В. Малозёров. – Новосибирск, 2005. – 248 с.
17. Пресняков, Л. А. Спецоборудование наземных транспортных средств специального назначения / Л. А. Пресняков. – Ч. 1. Механизмы обеспечения горизонтальной перегрузки грузов: учеб. пособие. – М. : МАДИ, 2018. – 148 с.
18. Пресняков, Л.А. Спецоборудование наземных транспортных средств специального назначения / Л. А. Пресняков – Ч. 2. Механизмы обеспечения вертикального перемещения и транспортировки специальных грузов: учеб. пособие. – М. : МАДИ, 2019. – 140 с.
19. Фатюхин, Д. С. Ультразвуковые технологии повышения эксплуатационных свойств изделий транспортного машиностроения: диссертация ... доктора технических наук: 05.02.08 / Д. С. Фатюхин ; МАДИ. – Москва, 2014. – 346 с.