

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

Институт компьютерных и инженерных наук  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы  
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика  
Направленность (профиль) образовательной программы – Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Зам. Зав. кафедрой  
 В.В. Соловьев  
«10» июня 2024г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Разработка конструкции сухого отсека второй ступени ракетносителя  
на основе полимерного композитного материала

Исполнитель  
студент группы 0109-об

  
(подпись, дата)

Агеенко В.Е.

Руководитель  
доцент, канд.техн.наук.

  
(подпись, дата)

Соловьев В.В.

Консультант по БЖД  
канд. тех наук, доцент

  
(подпись, дата)

Козырь А.В.

Нормоконтроль  
ст. преподаватель СиТРК

 05.06.24  
(подпись, дата)

Аревков М.А.

Благовещенск 2024

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

Институт компьютерных и инженерных наук  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ  
Зам. Зав. кафедрой  
 В.В. Соловьев  
«22» мая 2024г.

### ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Агеенко Владислава Евгеньевича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка конструкции сухого отсека второй ступени ракетносителя на основе полимерного композитного материала

(утверждена приказом от 01.04.2024 №852-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы 12.06.2024 г.

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

4. Содержание выпускной квалификационной работы: Понятие композиционных материалов, полиэфирные смолы, виды формовки, моделирование в COMSOL Multiphysics, безопасность жизнедеятельности, экономическая часть.

5. Перечень материалов приложения: титульный лист, цели и задачи, составные части ОЧ РН, формовка прессованием, создание 3D модели, моделирование в COMSOL Multiphysics, заключение.

6. Консультант по БЖД: Козырь А.В., доцент, канд. тех. наук.

7. Дата выдачи задания 22.05.2022 г.

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

Задание принял к исполнению (дата):  22.05.2024г.

## РЕФЕРАТ

Настоящая бакалаврская работа содержит 72 страниц, 13 рисунков, 2 таблицы, 10 источников.

### ПОЛИМЕРНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, СТЕКЛОПЛАСТИК, ПОЛИЭФИРНЫЕ СМОЛЫ, ФОРМОВАНИЕ ПРЕССОМ, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОЧНОСТЬ, ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА

В работе представлены результаты исследований композитных материалов на основе стекловолокна, и полиэфирных смол включая их физико-механические характеристики и процессы изготовления.

Цель работы – конструкции сухого отсека из композитных материалов для снижения загрязнений падающими элементами РКН.

Задачи:

- Анализ информации о компонентах композитов, выбор материалов и способов формообразования будущего изделия;
- Создание модели образцов;
- Проведение моделирования в COMSOL Multiphysics ;
- Определение физико-механических характеристик.

В основной части описаны технологии производства композитов и их результаты испытаний. В разделе безопасности жизнедеятельности рассмотрены требования при работе с вредными веществами и мероприятия при компоновке рабочей зоны. В экономической части были рассчитаны затраты на материалы и заработную плату исследователю.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1.1 Экологические проблемы, связанные с падением элементов РКН: .....	8
1.1.2 Ожидаемые результаты:.....	8
1.2 Цель и задачи исследования конструкции ОЧ из композитных материалов для снижения загрязнений падающими элементами РКН.....	9
1.3 Структура работы над созданием ОХЧ ракеты "Союз 2.1б" из стеклопластика может быть представлена следующим образом:.....	13
2 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ.....	18
2.1 Проблемы загрязнения окружающей среды падающими элементами РКН .....	18
2.1.1 Необходимость разработки новых методов защиты от загрязнений: .....	18
2.2 Композитные материалы в ракетостроении и авиации .....	18
2.3 Виды и маркировка полиэфирной смолы и Е-стекловолокна (стеклопластика), используемых в ракетостроении: .....	20
2.3.1 Физические характеристики изделий из полиэфирной смолы и Е-стекловолокна (стеклопластика) используемых в ракетостроении: .....	21
2.4 Виды производств деталей из КМ .....	22
Прессование изделий из полиэфирной смолы и Е-стекловолокна (стеклопластика) в ракетостроении:.....	23
2.5 Анализ конструкций сухих отсеков из КМ.....	25
3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СУХОГО ОТСЕКА.....	27
3.1 Определение геометрических параметров сухого отсека .....	27
3.2 Этапы разработки конструкции СО из КМ: .....	29
3.3 Расчет прочности и устойчивости конструкции .....	30

3.4 Оптимизация конструкции ОЧ РН .....	31
4 ПРЕСОВАНИЕ КАК МЕТОД ФОРМОВКИ КОМПОЗИТОВ.....	33
4.1 Принцип работы прессования как метода формовки композитов. ....	33
4.2 Технологические параметры формовки ОЧ РН из композитов: .....	34
4.3 Описание технологического процесса формовки ОЧ РН из композитов при помощи пресса: .....	36
4.3.1 Подготовка пресс-формы: .....	36
4.3.2 Укладка препрега: .....	36
4.3.3 Прессование: .....	37
4.3.4 Охлаждение: .....	37
4.3.5 Извлечение изделия из пресс-формы:.....	38
4.4 Контроль качества формованных ОЧ РН из композитов:.....	38
4.5 Преимущества и недостатки формовки ОЧ РН из композитов при помощи пресса:.....	39
5.1. Определение геометрических параметров ОХЧ РН «Союз 2.1б».....	41
5.1.2 Определение геометрических параметров ОХЧ РН Союз 2.1б .....	42
5.2 Создание 3д модели.....	44
6 ПРОВЕДЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В COMSOL Multiphysics .....	46
6.1 Подбор материала и расчет физических характеристик исследуемых материалов .....	46
6.1.1 Физические характеристики алюминиевого сплава АМгб.....	46
6.1.2 Физические характеристики КМ из полиэфирной смолы и Е- стекловолокна (стеклопластика).....	46
6.2 Испытание структуры ОХЧ РН из алюминия при действии на нее напряжения .....	47

6.3 Испытание структуры ОХЧ РН из КМ при действии на неё напряжения .....	49
6.4 Анализ результатов и сравнение полученных данных .....	51
6.5 Построение модели на основе полученных данных и ее анализ .....	52
6.5.1 Анализ полученных данных.....	53
7 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	57
7.1 Классификация помещений по электробезопасности .....	58
7.2 Технические способы и средства защиты при работе с электрооборудованием .....	60
7.3 Расчет заземления .....	62
8 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	65
8.1 Покупка программного обеспечения (ПО) .....	65
8.2 Основная заработная плата.....	66
8.3 Страховые взносы.....	67
8.4 Расчет затрат на создание опытного образца .....	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	70
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	72

## ВВЕДЕНИЕ

Ракетно-космическая техника (РКТ) играет важную роль в современном мире. Однако использование РКН неизбежно приводит к образованию значительного количества отходов, которые загрязняют окружающую среду.

Одним из наиболее значительных источников загрязнения являются падающие элементы РКН, такие как корпуса ступеней, обтекатели и подобные. Эти элементы, сгорая в атмосфере, оставляют после себя токсичные вещества, которые оседают на поверхности земли и водных объектов.

### Проблема загрязнения

Загрязнение, вызванное падающими элементами РКН, представляет собой серьезную проблему по ряду причин:

- Вред для здоровья человека: Токсичные вещества, содержащиеся в продуктах сгорания, могут нанести вред здоровью человека, вызывая различные заболевания, включая рак;
- Деградация окружающей среды: Загрязнение может привести к деградации почвы и водных ресурсов, что негативно влияет на экосистемы и биоразнообразие;
- Экономический ущерб: Загрязнение может привести к экономическим потерям, связанным с очисткой окружающей среды и компенсацией ущерба, нанесенного здоровью людей и имуществу.

Для решения проблемы загрязнения, вызванного падающими элементами РКН, необходимо разработать новые технологии, которые позволят минимизировать количество отходов и их негативное влияние на окружающую среду.

### Использование композитных материалов.

Одним из перспективных решений является использование сухих отсеков из композитных материалов.

## 1 АКТУАЛЬНОСТЬ ВЫБРАННОЙ ТЕМЫ

### 1.1 Экологические проблемы, связанные с падением элементов РКН:

Падающие на землю элементы РКН несут огромный вред биосфере, загрязняют остатками топлива: почву, поля, водоемы, уничтожают леса в случае возгорания, несут опасность для человека, поскольку вещества содержащиеся в падающих частях РКН очень ядовиты и способны отравлять изнутри.

#### 1.1.1 Необходимость разработки новых методов защиты от загрязнений:

На данный момент существуют способы защиты, это сбор и последующая утилизация отработанных частей РН, их сжигание и переплавка, но все эти методы несут за собой огромные экономические траты, определение зоны падения, поиск, сбор транспортировка.

Композиты в свою очередь обладают некоторыми преимуществами, по сравнению с ныне используемыми материалами: большая плотность, стойкость, малой химической активностью и весом.

ОЧ РН на основе композита, будет выигрывать во многих аспектах, именно по этой причине его освоение в космической промышленности лишь дело времени.

#### 1.1.2 Ожидаемые результаты:

- Разработка конструкции сухого отсека из композитных материалов, обеспечивающей защиту от загрязнений падающими элементами РКН;
- Определение оптимальных параметров конструкции сухого отсека на основании моделирования и расчета основных физических характеристик;
- Разработка технологии изготовления сухого отсека из композитных материалов;
- Проведение моделирования поведения сухого отсека под нагрузкой и оценка его эффективности.

Разработка конструкции сухого отсека из композитных материалов для

снижения загрязнений падающими элементами РКН является актуальной темой, которая имеет большое научное и практическое значение. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых методов защиты от загрязнений, которые будут более эффективными и экологичными, чем существующие методы.

## **1.2 Цель и задачи исследования конструкции ОЧ из композитных материалов для снижения загрязнений падающими элементами РКН**

Цель исследования:

Разработать конструкцию сухого отсека из композитных материалов, обеспечивающую эффективную защиту от загрязнений падающими элементами РКН.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих методов защиты от загрязнений падающими элементами РКН и выявить их недостатки;
2. Изучить свойства композитных материалов и их пригодность для разработки конструкции сухого отсека;
3. Разработать конструкцию сухого отсека из композитных материалов, обеспечивающую необходимую прочность, устойчивость к воздействию агрессивных сред и малый вес;
4. Оптимизировать конструкцию сухого отсека с точки зрения его технологичности и экономичности;
5. Разработать технологию изготовления отделяемой части из композиционного материала;
6. Провести моделирование поведения сухого отсека в момент падения и оценить его эффективность;
7. Разработать рекомендации по применению сухого отсека.

Практическая значимость:

Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых методов защиты от загрязнений, которые будут лучше справляться со своей

ролью и будут более экологичными, чем существующие методы.

Падение элементов ракетно-космической техники (РКН) на Землю является одной из актуальных проблем современности.

Основные проблемы, связанные с падением элементов РКН:

- Загрязнение окружающей среды, при падении на Землю элементы РКН загрязняют почву и водоемы токсичными веществами, такими как гидразин, гептил, пероксид водорода и другие.
- Токсичные вещества, содержащиеся в элементах РКН, представляют опасность для здоровья человека, особенно при попадании в организм через воду или пищу;
- Падение элементов РКН приводит к разрушению зданий, линий электропередач и других объектов инфраструктуры, а это в свою очередь к значительным экономическим тратам.

Меры по снижению загрязнения окружающей среды падающими элементами РКН:

- Усовершенствование существующих отделяемых частей, разработка более надежных и РКН, меньше разрушающихся при падении на Землю;
- Замена токсичных материалов, используемых в космической инфраструктуре, на более экологичные материалы, несущих меньший вред;
- Разработка более совершенных систем расчета траектории падения частей РКН, которые позволят точнее выводить их на орбиту и сводить;
- Создание систем сбора и утилизации падающих элементов РКН, которые позволят собирать и утилизировать падающие элементы РКН, не допуская их долговременного нахождения в месте падения, и последующего его загрязнения.

Производство отделяющихся частей ракет из композита поможет решить большую часть основных проблем, это менее опасный материал, вред, причиняемый, окружающей среде намного меньше, чем от используемых сейчас материалов. Уменьшение веса несущей конструкции, что позволит увеличить

максимальную грузоподъемность при той же технической схеме, а также делает траекторию падения более предсказуемой, ввиду меньшей массы ОЧ.

В настоящее время для защиты от загрязнений и вреда, вызванных падением элементов РКН, используются различные методы:

1. Зонирование:

- Определение зоны падения, где с наибольшей вероятностью могут упасть элементы РКН;

- Ограничение доступа людей и животных в зоны падения;

- Создание систем оповещения населения о падении элементов РКН.

2. Контроль траектории:

- Разработка более точных систем управления траекторией РКН, которые будут позволять точнее выводить их на орбиту и сводить с орбиты;

- Сжигание РКН на орбите, чтобы они не падали на Землю.

3. Защита объектов:

- Строительство защитных сооружений вокруг стратегически важные объектов, таких, как атомные электростанции и водоочистные сооружения;

4. Сбор и утилизация:

- Разработка систем сбора падающих элементов РКН;

- Утилизация падающих элементов РКН на специальных полигонах.

5. Международное сотрудничество:

- Разработка международных соглашений, направленных на снижение загрязнения окружающей среды падающими элементами РКН;

- Обмен информацией о падении элементов РКН между странами.

Эффективность каждого из этих методов зависит от различных факторов, таких как тип РКН, его траектория, масса и размеры его элементов, а также от географических и климатических условий.

Недостатки:

- Зонирование: не всегда возможно ограничить доступ людей и животных в зоны падения;

- Контроль траектории: Сжигание РКН на орбите может привести к образованию космического мусора;
- Защита объектов: Строительство защитных сооружений может быть очень дорогостоящим;
- Сбор и утилизация: Сбор и утилизация падающих элементов РКН может быть сложной и опасной задачей.

Цель создания ОХЧ ракеты "Союз 2.1б" из полиэфирной смолы и Е-стекловолокна (стеклопластика) в ракетостроении:

- Снижение массы, стеклопластик значительно легче стали и других традиционных материалов, что позволяет уменьшить массу ОХЧ и увеличить полезную нагрузку ракеты;
- Повышение прочности, стеклопластик обладает высокой прочностью и жесткостью, что позволяет выдерживать высокие нагрузки;
- Снижение стоимости: Стеклопластик дешевле стали и других традиционных материалов, что позволяет снизить стоимость производства;
- Сокращение сроков изготовления, стеклопластик легко обрабатывается и формуется;
- Повышение коррозионной стойкости, что позволит увеличить срок службы ОХЧ.

Этапы проектирования ОХЧ ракеты "Союз 2.1б" из полиэфирной смолы и Е-стекловолокна (стеклопластика):

- Разработка оптимальной технологии изготовления ОХЧ из стеклопластика;
- Проведение испытаний ОХЧ из стеклопластика на прочность, жесткость и другие характеристики в программе COMSOL Multiphysics;
- Анализ модели ОХЧ из стеклопластика для применения в ракетостроении;
- Внедрение ОХЧ РН из стеклопластика в серийное производство.

### **1.3 Структура работы над созданием ОХЧ ракеты "Союз 2.1б" из стеклопластика может быть представлена следующим образом:**

Анализ требований:

- Изучение технических требований к ОХЧ, анализ требований к прочности, жесткости, массе, коррозионной стойкости и другим характеристикам ОХЧ;
- Оценка влияния ОХЧ из стеклопластика на характеристики ракеты: анализ влияния изменения материала ОХЧ на траекторию полета, устойчивость и другие характеристики ракеты.

Концептуальное проектирование:

- Разработка вариантов конструкции ОХЧ, разработка нескольких вариантов конструкции ОХЧ из стеклопластика с учетом требований и ограничений;
- Оценка и выбор оптимального варианта, сравнительный анализ с учетом критериев прочности, жесткости, массы, технологичности и стоимости.

Детальное проектирование:

- Разработка рабочих чертежей: Создание рабочих чертежей элементов ОХЧ из стеклопластика с указанием размеров, материалов и других технических требований;
- Разработка технологической документации, создание технологической документации, описывающей процесс изготовления ОХЧ из стеклопластика, включая выбор материалов, оборудования и технологические режимы.

Расчетно-аналитические работы:

- Проведение прочностных расчетов элементов ОХЧ из стеклопластика с использованием методов конечных элементов и других методов моделирования;
- Оценка влияния динамических нагрузок (вибрации, ударные нагрузки) на прочность и устойчивость ОХЧ из стеклопластика.

Лишь подробно ознакомившись со всеми расчетами, материалами и результатами моделирования, можно подвести итоги, анализ и сравнение преимуществ и недостатков композитного материала и более традиционных.

#### 1.4 Характеристики РП ОЧ РН, пускаемых с космодрома «Восточный»

Ракета-носитель (РКН) "Союз 2.1б" является многоступенчатой системой, предназначенной для вывода на орбиту различных космических аппаратов. В процессе полета от РКН отделяются ступени, обтекатели и другие компоненты. Зоны падения этих элементов представляют собой обширные территории, характеристики которых важны для обеспечения безопасности населения и имущества.

Районы падения обширны: первая ступень: Россия, Казахстан; 200x50 км, вторая ступень: Тихий океан; 150x30 км, третья ступень: Россия, Казахстан, Монголия; 100x20 км, обтекатели: Тихий океан; сгорают в атмосфере.

Таблица 1 – Характеристики РП ОЧ РН, пускаемых с космодрома «Восточный» РН «Союз-2» этапа Ia, 1б

Отделяющаяся часть РН	Геодезические координаты центра эллипса, вершин многоугольника		Размеры полуосей		Азимуг большой ОСИ, градус	Субъект РФ
	северная широта, градус, мин	восточная долгота, градус, мин	большая полуось, км	малая полуось, км		
<b>РН «Союз-2» этапа Ia, 1б</b>						
Наклонение $i=51,7^\circ$						
Боковые блоки	51° 56'	132° 06'				Хабаровский край
	51° 49'	134° 12'				
	51° 27'	134° 07'				
	51° 34'	132° 02'				
Головной обтекатель	51° 05'	139° 57'	± 45	± 25	102	Хабаровский край
Центральный блок, хвостовой	49° 13'	150° 18'	± 75	± 50	1 > 0	Сахалинская область

Наклонение $i=64,8^\circ$						
Боковые блоки	54° 37'	132° 15'				Хабаровский край
	54° 21'	132° 43'				
	53° 51'	131° 49'				
	54° 06'	131° 23'				
Головной обтекатель	56° 38'	136° 32'	± 45	± 25	50	Хабаровский край
Центральный блок, хвостовой отсек	60° 51'	147° 57'	± 75	± 50	60	Магаданская область
Наклонение $i=98^\circ$						
Боковые блоки	54° 52'	126° 56'	± 25	± 15	342	Амурская область
Головной обтекатель	59° 38'	124° 17'	± 45	± 25	341	Республика Саха (Якутия)

Ознакомившись с таблицей можно понять, что разброс координат РП ОЧ РК велик, и зависит от множества факторов, таких как: погодные условия, окна запуска, наклона, траектории и многих других, из этого следует, что РП будет отличаться из раза в раз. И денежные затраты будут велики, как и вред, наносимый окружающей среде, в момент пребывания ОЧ в месте падения.

Расположение районов падения и номенклатуры приведены на рисунках 1,2.

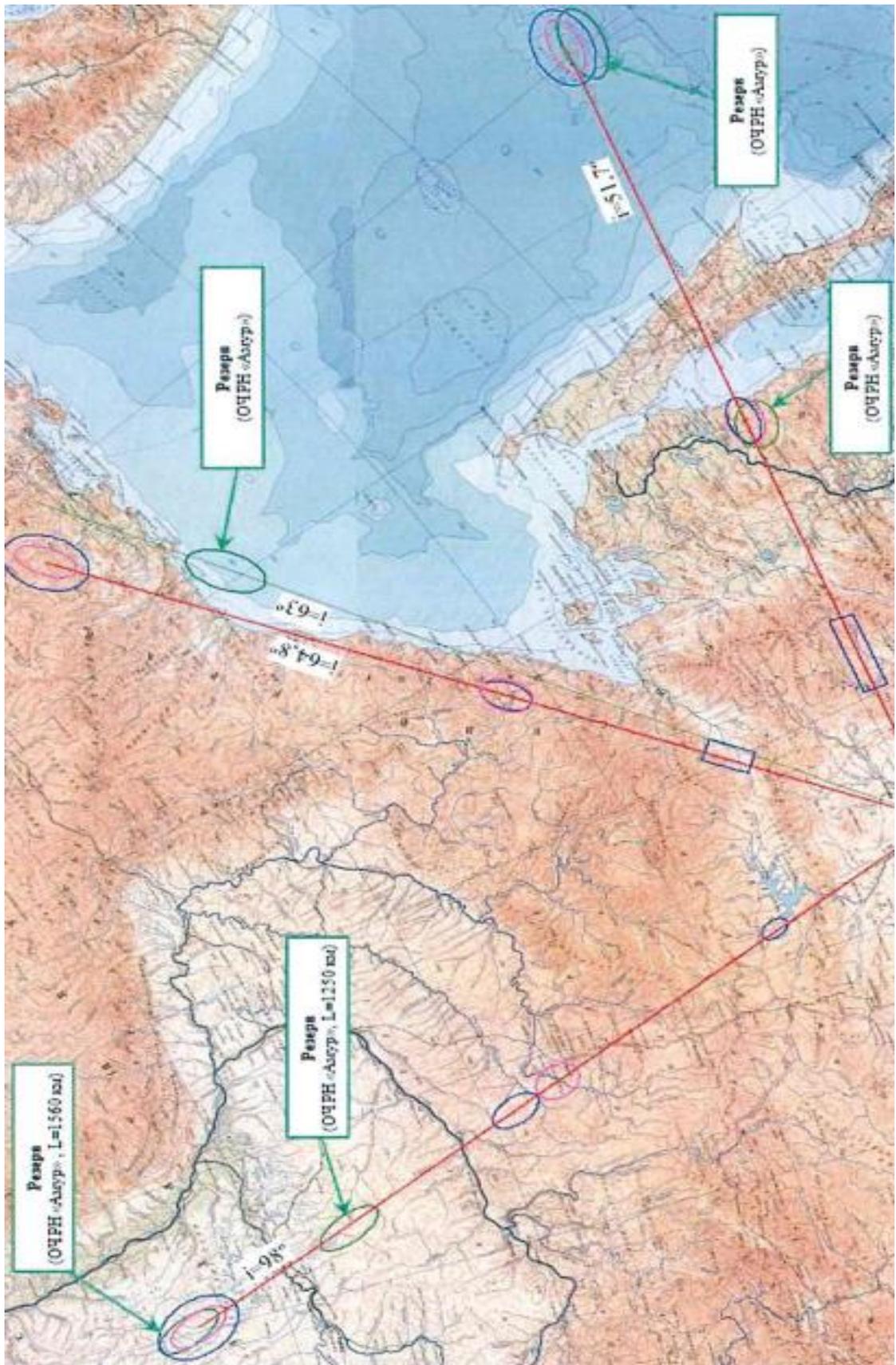


Рисунок 1 – Районы падения отделяемых частей ракетносителя

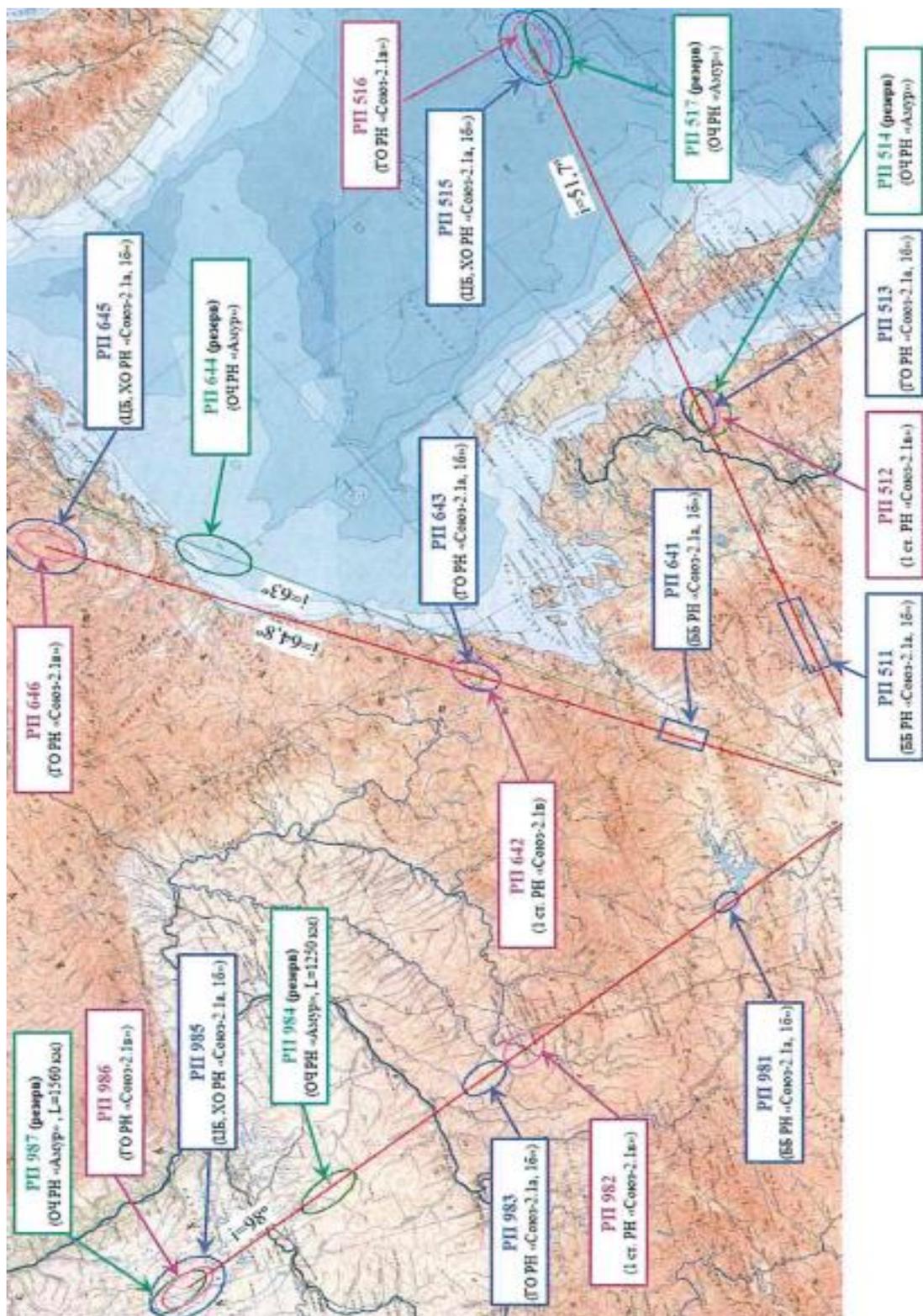


Рисунок 2 – Номенклатура РП ОЧ

Данные рисунки наглядно показывают, насколько обширны районы падения, это позволяет оценить масштабы зон поиска и экономических затрат.

## 2 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ

### 2.1 Проблемы загрязнения окружающей среды падающими элементами РКН

Экологические проблемы, связанные с падением элементов РКН:

- При падении на землю элементы РКН могут загрязнять почву и водоемы токсичными веществами, такими как гидразин, гептил, пероксид водорода и другие;
- Падение крупных элементов РКН может привести к разрушению лесов, полей, водоемов и других природных объектов;
- Токсичные вещества, содержащиеся в элементах РКН, могут представлять опасность для здоровья человека, особенно при попадании в организм через воду или пищу.

#### 2.1.1 Необходимость разработки новых методов защиты от загрязнений:

- Существующие методы защиты: в настоящее время для защиты от загрязнений используются различные методы, такие как захоронение элементов РКН на специальных полигонах, сжигание или переработка. Однако эти методы не всегда являются эффективными и могут иметь негативные последствия для окружающей среды;
- Композитные материалы обладают высокой прочностью, коррозионной стойкостью и малым весом, что делает их перспективным материалом для разработки новых методов защиты от загрязнений;
- Сухой отсек представляет собой конструкцию, которая защищает окружающую среду от загрязнений, падающих элементов РКН. Использование композитных материалов при разработке сухого отсека позволит повысить его прочность, снизить вес и сделать его более устойчивым к воздействию агрессивных сред.

### 2.2 Композитные материалы в ракетостроении и авиации

Композитные материалы (КМ) представляют собой класс материалов,

состоящих из двух или более компонентов, в нашем случае полиэфирной смолы и стекловолокна. В ракетостроении и авиации они активно используются благодаря своим свойствам, таким как:

- КМ значительно прочнее и жестче, чем традиционно используемые материалы, такие как металлы, при этом обладают меньшим весом;
- КМ значительно легче, чем традиционные материалы, что может привести к значительному снижению веса летательных аппаратов.
- КМ устойчивы к коррозии, что делает их идеальными для использования в агрессивных средах, таких как атмосфера и морская вода.
- Композиты могут выдерживать высокие температуры, ввиду этого они являются идеальным материалом для использования в таких областях, как двигатели и системы термозащиты.
- КМ могут поглощать электромагнитные волны, что делает их идеальными для использования в подобных сферах, как радиолокационные стелс-технологии.

В ракетостроении и авиастроении КМ используются в различных компонентах, таких как:

- Корпусов ракет, это позволяет снизить их вес и повысить прочность;
- Компоненты двигателей, такие как лопатки турбин и камеры сгорания;
- Сопла ракет, выдерживающие высокие температуры и давление;
- Легкие и прочные антенны.
- Крылья, что позволяет снизить их вес и повысить аэродинамические характеристики;
- Фюзеляжи, позволяя снизить их вес и повысить прочность;
- Хвостовое оперение, что позволяет повысить их управляемость;

Применение КМ в ракетостроении и авиации позволило создать более легкие, прочные и эффективные летательные аппараты. По мере совершенствования технологий КМ их использование в этих отраслях будет

только расти.

Примеров использования КМ в ракетостроении и авиации:

- Космический челнок "Шаттл" широко использовал КМ в своей конструкции, включая крылья, фюзеляж и хвостовое оперение;
- Самолет Boeing 787 Dreamliner: Самолет Boeing 787 Dreamliner имеет фюзеляж, изготовленный на 50% из КМ, что позволило снизить его вес на 20% по сравнению с традиционными самолетами;
- Авиационный двигатель GE90, он имеет лопатки вентилятора, изготовленные из КМ, что позволило повысить его эффективность на 15%.

### **2.3 Виды и маркировка полиэфирной смолы и E-стекловолокна (стеклопластика), используемых в ракетостроении:**

Полиэфирные смолы:

- Ненасыщенные полиэфирные смолы: Самые распространенные смолы в ракетостроении. Они отличаются доступной ценой, простотой использования и высокой прочностью. Наиболее популярные марки: ПН-1, ПН-2, ПН-6;
- Насыщенные полиэфирные смолы: более прочные и стойкие к химическим веществам по сравнению с ненасыщенными смолами, но более дорогие и сложные в использовании. Наиболее популярные марки: ЭД-20, ЭД-6, Э-40.

Стекловолокно:

- E-стекло (E-glass): Самый распространенный тип стекловолокна в ракетостроении. Он отличается высокой прочностью, легким весом и доступной ценой. Наиболее популярные марки: ЭС-1, ЭС-2, ЭС-3;
- S-стекло (S-glass): более прочное и стойкое к высоким температурам по сравнению с E-стекловолокном, но более дорогое и сложное в использовании. Наиболее популярные марки: СЭС-1, СЭС-2, СЭС-3.

Стеклопластик маркируется согласно ГОСТ 25657-85, где указывается тип смолы и тип стекловолокна. Например, ПН-1-ЭС-1 означает стеклопластик,

изготовленный из ненасыщенной полиэфирной смолы ПН-1 и Е-стекловолокна ЭС-1.

Прочность стеклопластика зависит от типа смолы, стекловолокна и технологии изготовления. В ракетостроении используются КМ с прочностью на растяжение от 1500 до 3000 МПа и прочностью на сжатие от 1000 до 2000 МПа.

Стоит обратить внимание, что выбор конкретного вида полиэфирной смолы и Е-стекловолокна для использования определяется конкретными требованиями к детали или компоненту. В нашем случае будет использоваться Е-стекловолокна в комбинации с ненасыщенной полиэфирной смолой ПН-2, ввиду относительно малой стоимостью и более простой эксплуатацией.

### **2.3.1 Физические характеристики изделий из полиэфирной смолы и Е-стекловолокна (стеклопластика) используемых в ракетостроении:**

#### 1. Прочность:

- Прочность на растяжение: 1500-3000 МПа (в зависимости от типа смолы, стеклоткани и технологии изготовления);
- Прочность на сжатие: 1000-2000 МПа (в зависимости от типа смолы, стеклоткани и технологии изготовления);
- Модуль упругости при растяжении: 40-60 ГПа (в зависимости от типа смолы, стеклоткани и технологии изготовления);
- Ударная прочность: 20-100 кДж/м<sup>2</sup> (в зависимости от типа смолы, стеклоткани и технологии изготовления).

#### 2. Легкий вес:

- Плотность: 1,2-1,5 г/см<sup>3</sup> (в зависимости от типа смолы, стеклоткани и технологии изготовления);
- В 6-7 раз легче стали.

#### 3. Стойкость к коррозии:

- Устойчив к воздействию воды, солей, кислот и щелочей;
- Не подвержен гниению и окислению.

#### 4. Термостойкость:

- Рабочая температура:  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+500^{\circ}\text{C}$  (в зависимости от типа смолы, стеклоткани и технологии изготовления), может выдерживать кратковременное воздействие более высоких температур;

#### 5. Радиопрозрачность:

- Некоторые виды стеклопластика радиопрозрачны, что делает их идеальными для применения в радиолокационных системах;

#### 6. Вакуумная плотность:

- Стеклопластик обладает высокой вакуумной плотностью, что делает его идеальным для применения в космических аппаратах.;

#### 7. Сопротивление усталости:

- Стеклопластик обладает высоким сопротивлением усталости, что делает его идеальным для применения в условиях циклических нагрузок.

Необходимо не забывать, о том, что физические характеристики изделий из полиэфирной смолы и E-стекловолокна, используемых в ракетостроении, могут значительно отличаться в зависимости от соотношения компонентов. Это в свою очередь позволит корректировать затраты, рассчитывая необходимый запас прочности соотношения композита, для определенных нужд

### **2.4 Виды производств деталей из КМ**

Существует несколько основных видов производства деталей из E-стекловолокна в комбинации с ненасыщенной полиэфирной смолой ПН-2:

1. Ручное формование - самый простой и доступный метод, подходит для изготовления небольших партий деталей простой формы. Стекловолокно вручную укладывается в форму, пропитанную смолой. Требуется мастерства и опыта для достижения желаемого качества.

2. Напыление - стекловолокно напыляется на форму с помощью специального пистолета. Подходит для изготовления деталей сложной формы. Обеспечивает высокую скорость производства. Требуется специальное оборудование и навыков работы.

3. Контактное формование - Стекловолокно укладывается в форму,

покрытую гелкоатом. Гелкоат обеспечивает гладкую и блестящую поверхность. Подходит для изготовления деталей с высоким качеством поверхности. Требуется более сложной подготовки формы.

4. Прессование - Стекловолокно и смола помещаются в пресс-форму. Под действием давления и температуры происходит формование детали. Подходит для изготовления деталей с высокой точностью и повторяемостью. Требуется дорогостоящего оборудования.

5. Центробежное литье - Стекловолокно и смола заливаются в вращающуюся форму. Под действием центробежной силы происходит распределение материала по стенкам формы. Подходит для изготовления деталей сферической формы. Требуется специального оборудования.

Выбор метода производства зависит от нескольких факторов:

- Сложность формы детали, для простых форм подходит ручное формование, а для сложных - напыление или прессование;
- Требуемое качество поверхности, для деталей с высоким качеством поверхности подходит контактное формование;
- Объем производства, для небольших партий подходит ручное формование, а для массового производства – прессование;
- Бюджет, Ручное формование - самый доступный метод, а прессование - самый дорогой.

Помимо этих основных методов, существует множество других производства деталей из E-стекловолокна в комбинации с ненасыщенной полиэфирной смолой ПН-2, но вышеперечисленные являются наиболее подходящими.

Я склоняюсь к формовке изделия при помощи прессования, оно наиболее простое, при наличии необходимой формы и куда менее энергозатратно, по сравнению с иными способами.

Прессование изделий из полиэфирной смолы и E-стекловолокна (стеклопластика) в ракетостроении:

Прессование – один из наиболее распространенных методов изготовления изделий из стеклопластика в ракетостроении. Этот метод позволяет получить высокопрочные и точные изделия с низким содержанием пузырей и пористости.

Процесс прессования можно разделить на несколько этапов:

1. Подготовка:

- Пресс-форма тщательно очищается и смазывается разделительным составом;
- Стеклоткань нарезается на куски необходимого размера и формы;
- Подготовка смолы, она смешивается с отвердителем и другими необходимыми компонентами.

2. Загрузка пресс-формы:

- На поверхность пресс-формы наносится тонкий слой гелевого состава, который обеспечивает гладкую поверхность готового изделия;
- Стеклоткань укладывается в пресс-форму слоями в соответствии с конструкцией изделия;
- В пресс-форму заливается смола, которая пропитывает стеклоткань.

3. Прессование:

- Пресс-форма закрывается и подвергается давлению с помощью гидравлического пресса или другого оборудования;
- Изделие выдерживается под давлением в течение необходимого времени для отверждения смолы.

4. Извлечение из пресс-формы:

- Пресс-форма охлаждается до температуры извлечения изделия;
- Изделие аккуратно извлекается из пресс-формы.

5. Доработка:

- Изделие обрезается для удаления излишков смолы и стеклоткани;
- Изделие может подвергаться финишной обработке, такой как шлифовка, покраска или нанесение защитного покрытия.

Преимущества прессования:

- Высокая прочность, прессованные изделия из стеклопластика обладают высокой прочностью и жесткостью и меньшим количеством дефектов;
- Точность размеров и форм, этот способ позволяет получить изделия с высокой точностью к деталям;

## **2.5 Анализ конструкций сухих отсеков из КМ**

Сухие отсеки (СО) – это герметичные модули, размещаемые в ракете и предназначенные для хранения и обеспечения работоспособности чувствительного к влажности оборудования.

Традиционно СО изготавливались из металлических сплавов, но в последнее время все чаще используются композитные материалы (КМ).

Преимущества использования КМ:

- КМ обладают высоким соотношением прочности к весу, что позволяет снизить вес СО, что, в свою очередь, позволяет увеличить грузоподъемность ракеты;
- КМ выдерживают более высокие температуры, что особенно важно для СО, размещаемых вблизи ракетных двигателей;
- КМ позволяют создавать более сложные формы и конструкции СО, недоступные для традиционных материалов;
- КМ устойчивы к коррозии, что увеличивает срок службы СО.

Примеры конструкций СО из КМ:

- СО ракеты "Союз-5А": Изготовлен из углеродного волокна и обладает рекордно низким весом для СО такого размера;
- СО космического корабля "Orion": Изготовлен из углеродного и стеклопластика и обеспечивает высокую степень защиты оборудования от микрометеоритов;
- СО ракеты-носителя Falcon 9: Изготовлен из алюминий-литиевого сплава и обеспечивает оптимальное соотношение прочности, веса и стоимости.

Недостатки использования КМ:

- Высокая стоимость: КМ, как правило, дороже традиционных материалов;
- Сложность производства: Производство КМ требует использования специализированного оборудования и технологий;
- Ремонт: Ремонт поврежденных КМ может быть более сложным и дорогостоящим, чем ремонт традиционных материалов.

## 3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СУХОГО ОТСЕКА

### 3.1 Определение геометрических параметров сухого отсека

Разработка конструкции сухого отсека из КМ

Выбор типа конструкции сухого отсека из композитных материалов зависит от ряда факторов, таких как:

- Требуемая прочность и жесткость;
- Вес;
- Стоимость;
- Сложность изготовления;
- Требования к термоизоляции;

При проектировании сухих отсеков из композитных материалов необходимо учитывать ряд факторов, таких как:

- Выбор подходящих материалов;
- Толщина и ориентация слоев композита;
- Тип соединения;
- Анализ напряжений и деформаций;
- Моделирование.

Использование композитных материалов для создания сухих отсеков может привести к ряду преимуществ, таких как:

- Снижение веса;
- Повышение прочности и жесткости;
- Увеличение коррозионной стойкости;
- Улучшение электромагнитной экранировки;
- Повышение теплоизоляции.

Теоретические основы разработки конструкции отделяемой части ракетносителя:

Отделяемые части (ОЧ) ракетносителя – это элементы конструкции, которые отделяются от ракеты на различных этапах полета. К ОЧ относятся

головные обтекатели, хвостовые отсеки, разгонные блоки и другие элементы.

Разработка конструкции ОЧ является сложной инженерной задачей, которая требует комплексного подхода и учета множества факторов.

Теоретические основы разработки конструкции ОЧ:

#### 1. Аэродинамика:

- ОЧ должны обладать обтекаемой формой для минимизации аэродинамического сопротивления и обеспечения устойчивости полета. Форма ОЧ подбирается с учетом режимов полета ракеты (атмосферный или космический) и скорости движения. Например, головные обтекатели имеют коническую форму, а хвостовые отсеки более сложную аэродинамическую форму для обеспечения устойчивости полета на атмосферном участке траектории;

- При разработке формы ОЧ проводятся аэродинамические расчеты с использованием методов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований. Эти расчеты позволяют определить аэродинамические силы и моменты, действующие на ОЧ, а также оптимизировать их форму для минимизации аэродинамического сопротивления и обеспечения устойчивости полета.

#### 2. Прочность:

- ОЧ должны выдерживать высокие механические нагрузки на всех этапах полета, включая взлет, ускорение, атмосферный полет и отделение. Для этого при проектировании используются прочные материалы и оптимальная конструкция;

- Прочность ОЧ рассчитывается с использованием методов прочностного анализа, учитывающих различные факторы, такие как давление воздуха, динамические нагрузки и вибрации. Эти расчеты позволяют определить напряжения и деформации в элементах конструкции ОЧ и обеспечить их прочность с запасом.

#### 3. Термостойкость:

- ОЧ должны выдерживать высокие температуры при воздействии продуктов сгорания ракетного двигателя. Для защиты ОЧ от термических нагрузок используются теплозащитные покрытия и специальные материалы;
- При разработке теплозащиты ОЧ проводятся тепловые расчеты, которые позволяют определить температурное поле в элементах конструкции и подобрать оптимальные материалы

### **3.2 Этапы разработки конструкции СО из КМ:**

1. Формулировка требований, определение функций ОЧ, условий эксплуатации и требований к ним;
2. Концептуальное проектирование, разработка различных вариантов конструкции ОЧ и выбор оптимального решения;
3. Разработка чертежей, спецификаций и другой технической документации;
4. Проведение прочностных, тепловых, аэродинамических и других расчетов;
5. Создание компьютерных моделей для оценки работоспособности ОЧ в различных условиях;
6. Проведение лабораторных и летных испытаний ОЧ для подтверждения их соответствия требованиям.

#### Методы разработки конструкции ОЧ из КМ:

- Традиционные методы, использующие ручной труд и инженерные расчеты;
- Компьютерное проектирование (САПР), использование специализированных программных комплексов для создания 3D-моделей и проведения расчетов;
- Применение методов оптимизации для поиска оптимального варианта конструкции с точки зрения массы, прочности и других показателей.

#### Материалы для изготовления ОЧ из КМ:

- Углеродное волокно, обеспечивает высокую прочность и низкий вес;

- Стекловолокно, более доступный по цене материал, чем углеродное волокно, но с меньшей прочностью;
- Керамические композиты, используются для изготовления элементов ОЧ, подвергающихся высоким температурным нагрузкам.

### **3.3 Расчет прочности и устойчивости конструкции**

Расчет прочности и устойчивости конструкции отделяемой части (ОЧ) РКН является важнейшим этапом разработки, от которого зависит надежность и безопасность ракеты-носителя.

Цель расчета:

- Определить способность ОЧ выдерживать различные механические нагрузки на всех этапах полета (взлет, ускорение, атмосферный полет, отделение);
- Обеспечить прочность и устойчивость проектируемой конструкции;
- Предотвратить разрушение ОЧ и потенциальное падение ракеты.

Методы расчета:

- Метод конечных элементов (МКЭ), это наиболее универсальный метод, используется для дискретизации сложных конструкций на более простые элементы и решения систем уравнений механики сплошных сред.

Он позволяет определить напряжения, деформации и устойчивость конструкции в различных условиях нагрузки.

Пример: при расчете прочности головного обтекателя ракеты с использованием МКЭ, нужно учитывать не только механические нагрузки (давление воздуха), но и температурные напряжения, возникающие при движении ракеты в атмосфере.

Аналитические методы, более простой и быстрый способ расчета, используется для простых конструкций, позволяет быстро оценить их прочностные характеристики.

Пример: при расчете прочности простых цилиндрических элементов ОЧ (например, корпуса разгонного блока) можно использовать метод динамических

перемещений, он позволит провести анализ колебаний конструкции и определить ее динамическую устойчивость.

Пример: при расчете динамической устойчивости хвостового отсека ракеты с использованием этого метода, мы можем оценить его склонность к резонансным колебаниям и разрушению при определенных частотах вибрации.

### **3.4 Оптимизация конструкции ОЧ РН**

Оптимизация конструкции отделяемой части (ОЧ) РКН – это в первую очередь итеративный процесс, направленный на поиск наиболее эффективного варианта конструкции, удовлетворяющего всем требованиям.

Задачи оптимизации:

- Снижение массы, чем легче ОЧ, тем больше полезного груза может вывести ракета;
- Повышение прочности, ОЧ должна выдерживать высокие нагрузки на всех этапах полета;
- Улучшение аэродинамики, оптимальная форма ОЧ позволяет снизить аэродинамическое сопротивление и повысить устойчивость полета;
- Снижение стоимости, использование более доступных материалов и технологий производства позволит уменьшить затраты на изготовление ОЧ.

Методы оптимизации:

- Методы математического программирования (позволяют решать задачи оптимизации с ограничениями);
- Методы эвристического поиска, используются для решения сложных задач, где невозможно использовать точные математические модели;
- Методы компьютерного моделирования (позволяют визуализировать конструкцию ОЧ и проводить ее анализ в виртуальной среде).

Примеры оптимизации конструкции ОЧ;

- Использование композитных материалов, что обладают высоким соотношением прочности к массе, это позволяет создавать более легкие и прочные ОЧ;

- С помощью компьютерных программ можно оптимизировать форму ОЧ для минимизации аэродинамического сопротивления и повышения устойчивости полета;
- Применение новых технологий, например, использование аддитивных технологий позволяет создавать ОЧ сложной формы с меньшим количеством деталей и меньшим весом.

Оптимизация конструкции ОЧ РКН – это непрерывный процесс, который позволяет создавать более эффективные и надежные ракеты-носители.

## 4 ПРЕСОВАНИЕ КАК МЕТОД ФОРМОВКИ КОМПОЗИТОВ

### 4.1 Принцип работы прессования как метода формовки композитов.

В рамках данной статьи мы рассмотрим принцип работы прессования как одного из основных методов формовки изделий из композитных материалов (КМ).

Суть метода:

1. Препрег, представляющий собой ткань из пропитанного связующим веществом волокна, размещается в специальной пресс-форме;
2. На препрег с помощью гидравлических плунжеров или мембран прикладывается давление;
3. Под воздействием давления происходит уплотнение препрега и удаление из него излишков связующего вещества;
4. Происходит процесс полимеризации связующего вещества, результатом которого становится формирование твердого композитного материала.

Виды прессования:

- Горячее прессование, препрег предварительно нагревается до температуры полимеризации связующего вещества, после чего на него прикладывается давление;
- Холодное прессование, препрег не подвергается предварительному нагреву, а полимеризация связующего вещества происходит при комнатной температуре под давлением;
- Комбинированное прессование: сочетает в себе элементы как горячего, так и холодного прессования.

Преимущества прессования:

- Простота и технологичность реализации процесса;
- Возможность изготовления изделий сложной геометрической формы;

- Обеспечение высокой прочности и качества поверхности готовых изделий;

- Сравнительно невысокая стоимость производства.

Недостатки прессования;

- Ограничения по толщине изготавливаемых изделий;

- Необходимость использования специализированных пресс-форм;

- Чувствительность к наличию дефектов в препреге.

Области применения прессования:

Прессование нашло широкое применение в различных отраслях промышленности для изготовления широкого спектра изделий из КМ, в том числе:

- Авиационные и космические конструкции;

- Детали для автомобильной промышленности;

- Спортивный инвентарь;

- Строительные материалы;

- Бытовые товары.

В ракетостроении прессование используется для производства отделяемых частей ракетополетителей (ОЧ РН), таких как:

- Головные обтекатели;

- Хвостовые отсеки;

- Разгонные блоки.

#### **4.2 Технологические параметры формовки ОЧ РН из композитов:**

При формовке отделяемых частей ракетополетителей (ОЧ РН) из композитных материалов (КМ) при помощи прессы особое значение имеют технологические параметры, напрямую влияющие на качество и прочность готового изделия.

Ключевые параметры:

1. Давление под которым происходит прессование, определяет качество пропитки волокна связующим веществом, недостаточное давление, ниже 0.2-0.3

Мпа, приводит к образованию пор и расслоений в материале, а чрезмерное давление, более 10 Мпа, может привести к деформации и разрушению изделия.

- При производстве головных обтекателей РН из углеродных композитов используется давление в диапазоне 3-6 МПа.

## 2. Температура прессования:

- От нее зависит скорость и степень полимеризации связующего вещества. Слишком низкая температура, ниже 100°C, замедляет полимеризацию, может привести к неполному отверждению материала. Слишком высокая температура, более 200°C, может привести к разрушению связующего вещества и деградации механических свойств композита.

Для эпоксидных смол, используемых в качестве связующего вещества при производстве ОЧ РН, оптимальная температура прессования составляет 150-180°C.

## 3. Время выдержки под давлением:

- Недостаточное время выдержки может привести к неполному отверждению материала;

- Чрезмерное время выдержки, более 10 минут, не оказывает существенного влияния.

При производстве хвостовых отсеков РН из стекловолоконных композитов используется время выдержки под давлением от 5 до 7 минут.

## 4. Скорость нагрева и охлаждения, должны быть контролируемыми, для предотвращения образования внутренних напряжений, трещин в материале.

Несоблюдение этих параметров может привести к браку готовых изделий и снижению их эксплуатационных характеристик.

Важно отметить, что оптимальные значения технологических параметров определяются типом используемого КМ, геометрией изделия и требованиями к его качеству. Для точного подбора этих параметров необходимо проводить экспериментальные исследования и использовать специализированное программное обеспечение.

Создание высококачественных и прочных ОЧ РН из КМ требует тщательного контроля технологических параметров процесса формовки. Знание этих параметров и умение их правильно подбирать является залогом успешного производства.

#### **4.3 Описание технологического процесса формовки ОЧ РН из композитов при помощи пресса:**

Детальное, пошаговое описание технологического процесса формовки отделяемых частей ракетоносителей (ОЧ РН) из композитных материалов (КМ) при помощи пресса.

##### 4.3.1. Подготовка пресс-формы:

Очистка и обезжиривание:

- Пресс-форма подвергается тщательной очистке от любых загрязнений, включая пыль, смазочные материалы, остатки предыдущих прессований;

- Для обезжиривания используются специальные растворы, подбираемые с учетом типа материала пресс-формы и степени загрязнения.

Нанесение разделительного состава:

- На очищенную и обезжиренную поверхность пресс-формы наносится разделительный состав, обеспечивающий легкое извлечение готового изделия;

- Тип разделительного состава подбирается с учетом материала пресс-формы, типа КМ и условий прессования.

##### 4.3.2. Укладка препрега:

Раскрой препрега по шаблону:

- Препрег раскраивается на отдельные слои в соответствии с шаблоном будущей ОЧ РН;

- Шаблон изготавливается с учетом геометрических параметров ОЧ РН, толщины каждого слоя препрега и припусков на усадку.

Укладка слоев препрега в пресс-форму:

- Слои препрега аккуратно укладываются в пресс-форму в строгой последовательности, согласно технологической документации;

- При укладке слоев исключается образование складок, воздушных пузырей и других дефектов, которые могут привести к снижению прочности ОЧ РН.

Уплотнение слоев препрега:

- Каждый слой препрега уплотняется с помощью вакуумных мешков или специальных роликов;

- Уплотнение обеспечивает удаление излишков воздуха между слоями, повышение плотности препрега и улучшение пропитки волокна связующим веществом.

#### 4.3.3 Прессование:

Подача давления в пресс-форму:

- Давление в пресс-форму подается постепенно с помощью гидравлических плунжеров или мембран;

- Скорость подачи давления контролируется для предотвращения образования внутренних напряжений и деформации ОЧ РН.

Выдержка под давлением:

- Изделие выдерживается под давлением в течение заданного времени, необходимого для полной полимеризации связующего вещества;

- Время выдержки под давлением определяется типом КМ, геометрией ОЧ РН и требуемыми прочностными характеристиками.

Снятие давления:

- Давление из пресс-формы снимается постепенно для предотвращения образования трещин и внутренних напряжений в ОЧ РН.

#### 4.3.4 Охлаждение:

Изделие медленно охлаждается в пресс-форме до комнатной температуры. Скорость охлаждения контролируется для предотвращения образования термоусадочных напряжений и деформаций ОЧ РН.

#### 4.3.5. Извлечение изделия из пресс-формы:

Очистка изделия от остатков разделительного состава:

- Готовое изделие извлекается из пресс-формы и очищается от остатков разделительного состава.
- При необходимости проводится финишная обработка поверхности ОЧ РН, например, шлифование, полирование, нанесение защитных покрытий.

#### 4.4 Контроль качества формованных ОЧ РН из композитов:

В стремительно развивающейся области ракетостроения контроль качества отделяемых частей (ОЧ) ракетоносителей (РН) из композитных материалов (КМ) приобретает критическое значение.

Задачи контроля качества:

- Обеспечить безупречную надежность и долговечность ОЧ РН в условиях экстремальных нагрузок космического полета;
- Гарантировать соответствие готовых изделий всем заданным требованиям, включая прочность, геометрию, поверхность и другие критические параметры;
- Выявить и предотвратить наличие дефектов, которые могут привести к катастрофическим последствиям во время эксплуатации РН.

Современные методы контроля качества:

- Визуальный контроль - традиционный, но незаменимый метод, позволяющий обнаружить видимые дефекты, такие как трещины, поры, расслоения, неровности поверхности;
- Ультразвуковой контроль: Усовершенствованный метод, использующий ультразвуковые волны для обнаружения внутренних дефектов, таких как непрочности, поры, расслоения в толще материала;
- Рентгенографический контроль - один из самых точных методов, основанный на проникновении рентгеновских лучей в материал и фиксации скрытых дефектов на рентгенограмме;

- Дефектоскопия - специализированный метод, применяемый для выявления дефектов в сварных соединениях и других критических зонах ОЧ РН, обеспечивая их безопасность и надежность;
- Испытания на прочность - необходимый элемент контроля, позволяющий оценить фактические прочностные характеристики ОЧ РН в соответствии с требованиями нормативных документов;
- Контроль геометрических параметров - важный этап, гарантирующий соответствие геометрических размеров и формы ОЧ РН заданным параметрам конструкторской документации для бесперебойной работы всех элементов РН;
- Контроль поверхности - тщательный анализ поверхности ОЧ РН на наличие царапин, вмятин и воздушных пузырей

#### **4.5 Преимущества и недостатки формовки ОЧ РН из композитов при помощи прессы:**

Для современной космической индустрии формовка отделяемых частей (ОЧ) ракетносителей (РН) из композитных материалов (КМ) методом прессования играет ключевую роль, анализ этой технологии с акцентом на ее преимущества, недостатки, современные достижения и перспективные направления развития просто необходим.

Преимущества:

- Высокая производительность, прессование обеспечивает серийное производство ОЧ РН с коротким циклом изготовления;
- Автоматизация процесса гарантирует стабильность качества и снижение трудоемкости;
- Создание изделий сложной формы, подходит для ОЧ РН с криволинейными обводами, ребрами и другими сложными элементами;
- Реализуются аэродинамически оптимальные формы;

- Повышается маневренность и уменьшается сопротивление воздуху во время полета;
- Высокое качество поверхности, так как прессованные ОЧ РН имеют гладкую, ровную поверхность без дефектов;
- Улучшаются аэродинамические характеристики;
- Повышается стойкость к коррозии;
- Снижается риск обледенения и образования паразитных вихрей;
- Сравнительно низкая стоимость: Прессование является одним из самых доступных методов формовки композитов;
- Серийное производство и относительно простая технология снижают себестоимость изготовления ОЧ РН.

Недостатки:

- Ограниченная толщина изделий, прессованием невозможно изготовить ОЧ РН большой толщины;
- Применяются многослойные конструкции с использованием более тонких препрегов;
- Изготовление форм требует больших затрат времени и ресурсов;
- Сложность пресс-формы ограничивает возможности создания ОЧ РН сложной конфигурации;
- Чувствительность к дефектам препрега, складки, воздушные пузыри и неравномерная пропитка волокна приводят к образованию брака;
- Тщательный контроль качества препрега увеличивает затраты времени и снижает выход годной продукции;
- В некоторых случаях требуется полная замена изделия;
- Увеличиваются эксплуатационные расходы;
- Некоторые смолы, используемые в препрегах, токсичны и опасны для окружающей среды.

Требуются специальные меры защиты персонала и внедрение экологически чистых технологий производства.

## 5 ПРОЦЕСС ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ В КОМПАС-3D

### 5.1 Определение геометрических параметров ОХЧ РН «Союз 2.1б»

Габариты:

- Высота: 46,3 метра;
- Диаметр: 2,95 метра (в основной части);
- Размах стабилизаторов: 10 метров.

Масса:

- Стартовая масса: 463 тонны;
- Масса топлива: 388 тонн.

Количество ступеней: 4.

Характеристики ступеней:

1-я ступень (4 РД – 107А):

- Тип: Двухмодульная жидкостная ракетная ступень;
- Длина: 19,6 метра;
- Диаметр: 2,7 метра;
- Тяга: 806 тс (7940 кН);
- Топливо: Керосин/кислород.

2-я ступень (РД – 108А):

- Тип: Одномодульная жидкостная ракетная ступень;
- Длина: 27,1 метра;
- Диаметр: 2,95 метра;
- Тяга: 258 тс (в вакууме);
- Топливо: Керосин/кислород.

3-я ступень (РД - 0124):

- Тип: Одномодульная жидкостная ракетная ступень;
- Длина: 6,7 метра;
- Диаметр: 2,7 метра;
- Тяга: 359 тс (в вакууме);

- Топливо: Керосин/кислород.

Полезный груз:

- Максимальная масса на НОО: 6,6 – 7.4 тонны;
- Максимальная высота орбиты: 2000 километров.

Надежность:

- Вероятность успешного пуска: 0,98.

Отделяемые хвостовые створки «Союз 2.1б» – это три аэродинамических элемента, которые отсоединяются от третьей ступени ракеты-носителя «Союз 2.1б» после завершения ее работы.

Функции:

- Стабилизация: обеспечивают стабилизацию ракеты во время отделения третьей ступени и выведения полезного груза на орбиту;
- Снижение аэродинамического сопротивления: уменьшают аэродинамическое сопротивление ракеты после отделения третьей ступени, что позволяет экономить топливо;
- Защита полезного груза: защищают полезный груз от воздействия высоких температур и аэродинамических нагрузок во время его выведения на орбиту.

Конструкция:

- Изготовлены из сплава алюминия АМгб, который обладает высокой прочностью и средним весом;
- Имеют трапецевидную форму с заостренными краями для уменьшения аэродинамического сопротивления;
- Механизм отделения: отсоединяются от третьей ступени с помощью пиротехнических зарядов после завершения ее работы;
- Частично сгорают в атмосфере: после отделения от ракеты отделяемые хвостовые створки входят в атмосферу и падают на Землю.

### **5.1.2 Определение геометрических параметров ОХЧ РН Союз 2.1б(в)**

Поскольку информации в открытом доступе нет, точные геометрические

характеристики узнать не представляется возможным, можно только подобрать наиболее приближенные значения. А именно длина ОХЧ составляет где то половину, от длины 3 ступени, возьмем 4000 мм. Диаметр равен 2600 мм, створки три, зная формулу длины окружности находим длину дуги одной створки:

$$C=2\pi r/3=2721\text{мм} \quad (1)$$

где:  $C$  – длина окружности;

$\pi$  (пи) – математическая константа, приблизительно равная 3,14159;

$r$  – радиус окружности;

3 – количество створок.

Примерная толщина обшивки хвостового отсека равна 100 мм.

Зная все это, а также плотность металла, можем рассчитать примерный объем стенок, а в последствии и вес одной створки:

Объем стенок:

$$V=\pi h(r_2^2-r_1^2)/3=0.42\text{м}^3 \quad (2)$$

где:  $\pi$  (пи) – Математическая константа, приблизительно равная 3,14159;

$h$  – Высота цилиндра (в метрах, сантиметрах и т.д.);

$r_1$  – Внутренний радиус основания цилиндра (в метрах, сантиметрах и т.д.);

$r_2$  – Внешний радиус основания цилиндра (в метрах, сантиметрах и т.д.);

3 – количество створок

Плотность алюминиевого сплава АМгб, из которого сделаны ОЧ составляет 2 640 кг/м<sup>3</sup> при температуре 20°С.

Зная формулу плотность и объем находим примерный вес одной створки:

$$m=\rho V=1109\text{кг} \quad (3)$$

где:  $m$  – масса объекта (в килограммах, кг);

$\rho$  – плотность объекта (в килограммах на кубический метр, кг/м<sup>3</sup>);

$V$  – объем объекта (в кубических метрах, м<sup>3</sup>);

Но учитывая ее ребристую структуру и утолщения на концах, умножаем получившееся число на 1.5, и получаем значение равное 1715 кг.

## 5.2 Создание 3д модели

Теперь по полученным данным строим 3D модель створки используя КОМПАС-3D:

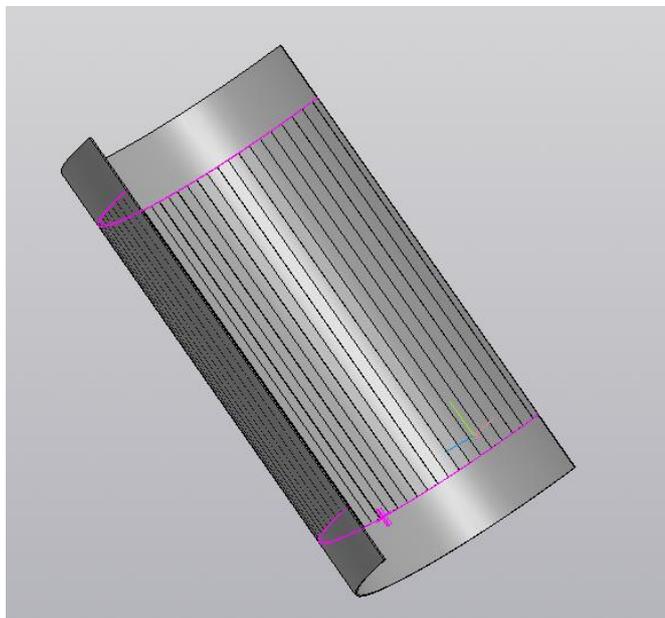


Рисунок 3 – 3D модель створки

Для наглядности построим чертеж по данной модели:

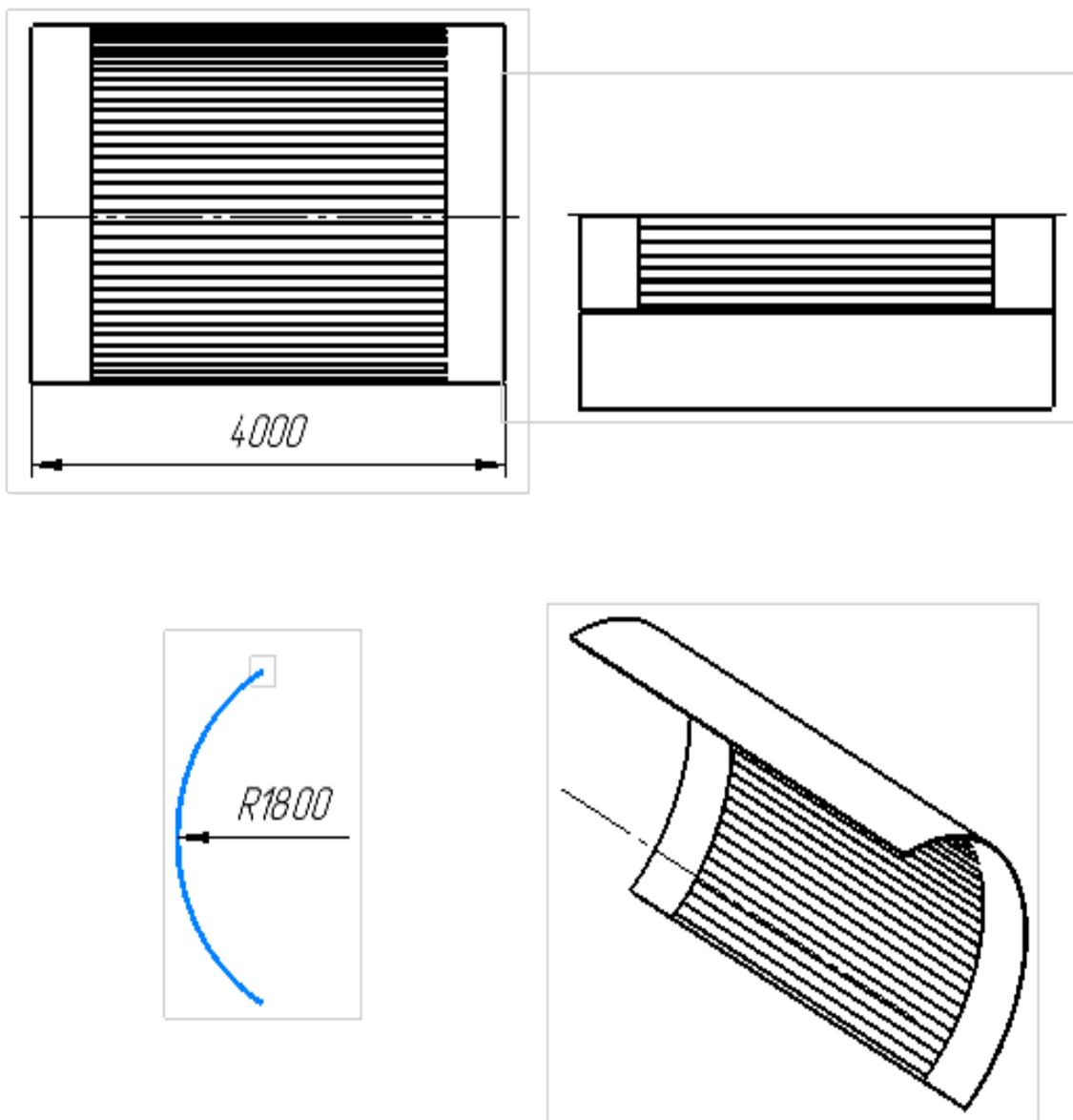


Рисунок 4 – Чертеж, построенный по 3D модели створки

## 6 ПРОВЕДЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ В COMSOL Multiphysics

### 6.1 Подбор материала и расчет физических характеристик исследуемых материалов

#### 6.1.1 Физические характеристики алюминиевого сплава АМг6

АМг6 – это деформируемый алюминиевый сплав, отличающийся высокой прочностью при низкой плотности.

Состав:

- Алюминий (Al): 91,1-93,68%;
- Магний (Mg): 5,8-6,8%;
- Марганец (Mn): 0,5-0,8%;
- Железо (Fe): до 0,4%;
- Кремний (Si): до 0,4%;
- Цинк (Zn): до 0,2%;
- Титан (Ti): 0,02-0,1%;
- Медь (Cu): до 0,1%.

Основные характеристики:

- Плотность: 2640 кг/м<sup>3</sup> (при 20°C) ;
- Температура плавления: 600-650°C.

Механические свойства:

- Предел прочности при растяжении: 130-385 МПа;
- Предел текучести: 110-330 МПа;
- Относительное удлинение: 12-20%;
- Твердость по Бринеллю: 65-110 НВ;
- Модуль упругости:  $0,71 \cdot 10^{-5}$  Мпа.

#### 6.1.2 Физические характеристики КМ из полиэфирной смолы и E-стекловолокна (стеклопластика)

КМ полиэфирная смола:

- Низкая плотность: 1,15 - 1,25 г/см<sup>3</sup>. Это значительно меньше плотности стали (7,85 г/см<sup>3</sup>), что позволяет снизить массу ракетных конструкций и повысить их грузоподъемность;
- Высокая прочность: 10 - 15 МПа. Обеспечивает необходимую прочность деталей и конструкций в условиях высоких нагрузок и вибраций;
- Химическая стойкость: высокая стойкость к большинству кислот, щелочей и растворителей, что важно при работе с агрессивными компонентами ракетного топлива;
- Водостойкость: нерастворима в воде, что обеспечивает стойкость деталей к воздействию атмосферных осадков и влаги;
- Быстрая полимеризация: позволяет быстро изготавливать детали и сокращать время производства;
- Доступность: относительно недорогой материал, что снижает стоимость ракетных конструкций.

Е-стекловолокно:

- Высокая прочность: 2000 - 3000 МПа. Обеспечивает высокую прочность на растяжение и изгиб, что необходимо для выдерживания нагрузок в условиях полета;
- Низкая плотность: 2,5 - 2,6 г/см<sup>3</sup>. В сочетании с низкой плотностью смолы позволяет создавать легкие и прочные конструкции;
- Устойчивость к высоким температурам: выдерживает температуры до 850 - 950°С, что важно при работе в условиях высоких температур во время полета;
- Диэлектрические свойства: является хорошим электроизолятором, что обеспечивает защиту электронных компонентов ракеты;
- Устойчивость к радиационному излучению: обладает некоторой степенью устойчивости к радиационному излучению, что важно при работе.

## **6.2 Испытание структуры ОХЧ РН из алюминия при действии на нее напряжения**

Используя программу COMSOL Multiphysics, начинаем испытание.

- Переносим 3D модель:

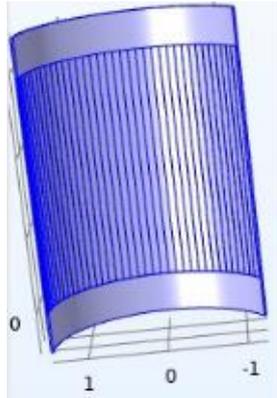


Рисунок 5 – Модель створки перенесенная в COMSOL Multiphysics

- Выбираем необходимый нам сплав алюминия:



Рисунок 6 – Выбор необходимого материала

- Ознакомляемся с формулами, что программа будет использовать для расчета прочностных характеристик:

Material Contents					
Property	Variable	Value	Unit	Property group	
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	rho_solid_1(T[1/K])[kg/m^3]	kg/m <sup>3</sup>	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Young's modulus	E	E(T[1/K])[Pa]	Pa	Young's modulus and Poisson's ratio	
<input checked="" type="checkbox"/> Poisson's ratio	nu	nu(T[1/K])	1	Young's modulus and Poisson's ratio	
Resistivity	res_iso ; resii = res_iso,...	res_solid_T86_4(T[1/K])[ohm*...	Ω·m	Basic	
Coefficient of thermal expansion	alpha_iso ; alhaii = al...	(alpha_solid_1(T[1/K])[1/K]+{...	1/K	Basic	
Heat capacity at constant pressure	Cp	C(T[1/K])[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	Basic	
Electrical conductivity	sigma_iso ; sigmaii = si...	sigma_solid_T86_4(T[1/K])[S/...	S/m	Basic	
Tangent coefficient of thermal expansion	alphan_iso ; alphan...	8.6*10^-8	1/K	Thermal expansion	
Thermal strain	dL_iso ; dLii = dL_iso, d...	(dL_solid_1(T[1/K])-dL_solid_...	1	Thermal expansion	
Bulk modulus	K	kappa(T[1/K])[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Bulk modulus and shear modulus	
Shear modulus	G	mu(T[1/K])[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Bulk modulus and shear modulus	

Рисунок 7 – Формулы расчета прочностных характеристик материала

- Задаем переменные и запускаем моделирование:

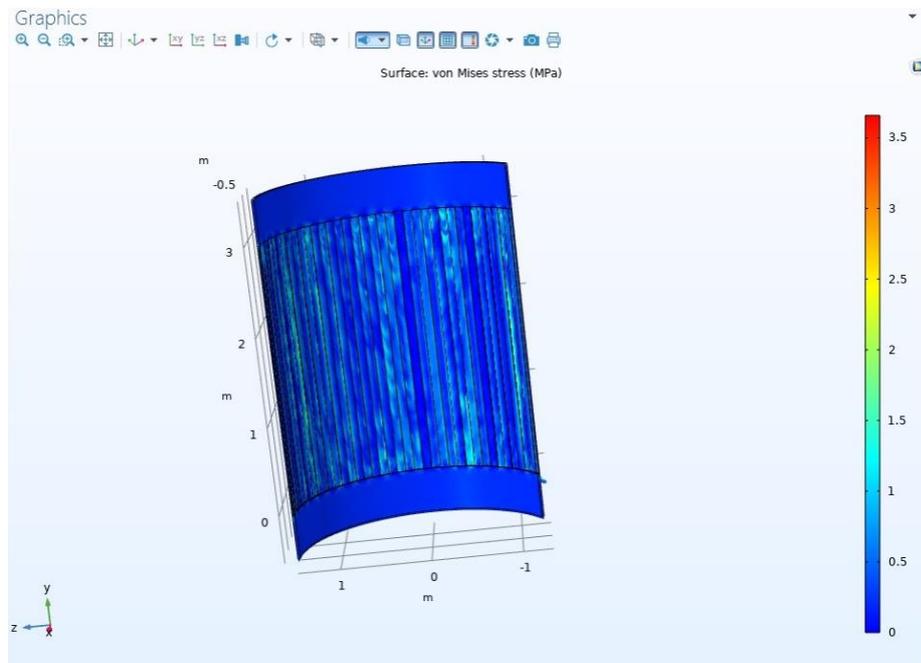


Рисунок 8 – Результаты моделирования

### 6.3 Испытание структуры ОХЧ РН из КМ при действии на неё напряжения

Используя программу COMSOL Multiphysics, начинаем испытание.

- Переносим 3D модель:

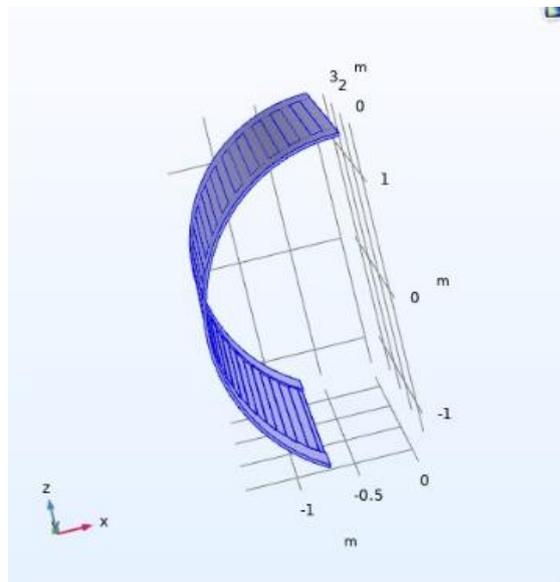


Рисунок 9 – Модель для исследования КМ

- Выбираем материал и ознакомившемся с формулами, задаем переменные, зависящие от выбора марки стекловолокна и смолы, указываем средние значения:

Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Dynamic viscosity	mu	0.05	Pa-s	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	1.5	kg/m <sup>3</sup>	Basic
Tangent coefficient of thermal expa...	alphatan_iso ; alphatanii =...	CTE(T[1/K]...	1/K	Thermal expansion
Thermal strain	dL_iso ; dLii = dL_iso, dLij...	7500	1	Thermal expansion

Рисунок 10 – Физические КМ данные для моделирования

- Запускаем моделирование и выводим график:

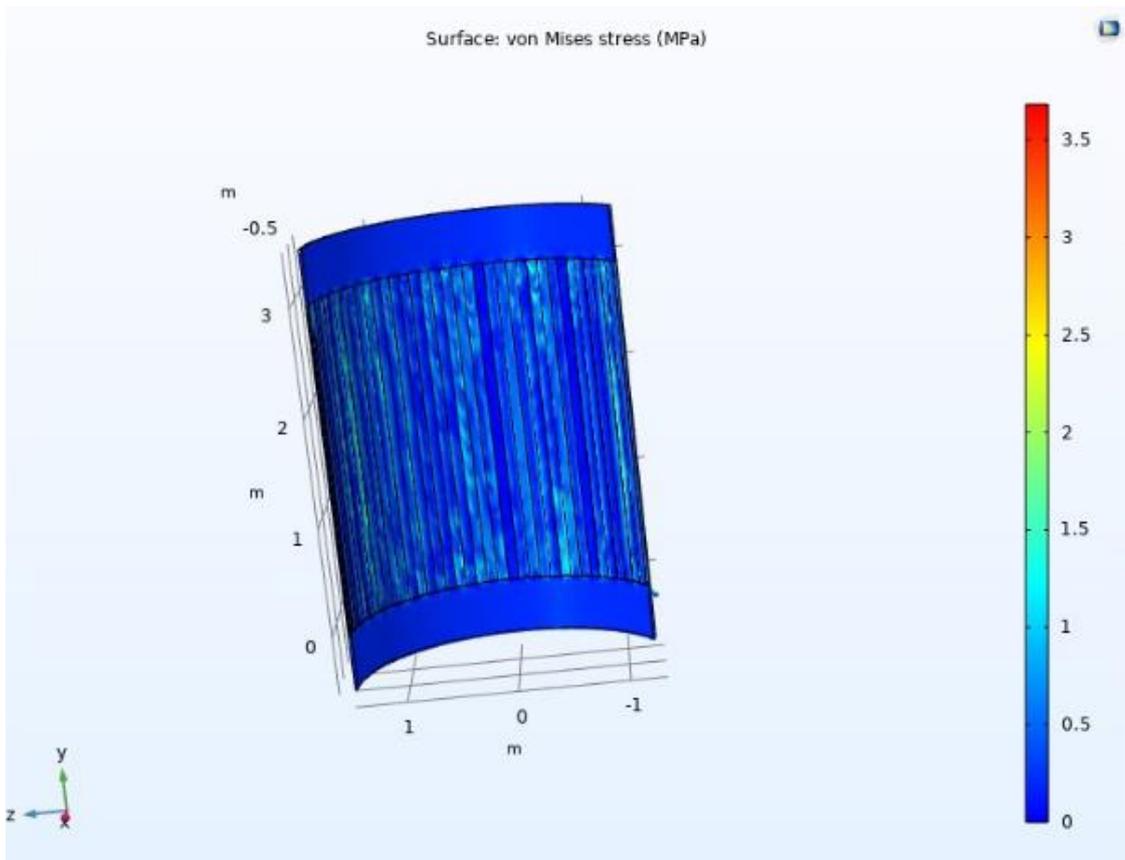


Рисунок 11 – Результаты анализа КМ

## 6.4 Анализ результатов и сравнение полученных данных

Таблица 2 – Сравнительные характеристики этих двух материалов:

Свойство	АМг6 алюминий	Стеклопластик (композит)
Плотность	2,52 – 2,6 г/см <sup>3</sup>	1,4 – 1,8 г/см <sup>3</sup>
Прочность при растяжении	130 – 385 МПа	100 – 150 МПа
Прочность при изгибе	150 – 300 МПа	30 - 50 МПа
Ударная вязкость	12-20 МДж/м <sup>2</sup>	20 – 30 МДж/м <sup>2</sup>
Модуль упругости	0,71 · 10 <sup>5</sup> МПа	3 – 4 ГПа
Химическая стойкость	Стойкость к атмосферным воздействиям и морской воде	Стойкость к многим кислотам, щелочам и растворителям
Термостойкость	До 500°С (до 600°С)	До 350°С (до 480°С)
Технологичность	Легко поддается обработке давлением (штамповка, прокатка), сварке и пайке	Сложнее обрабатывается, чем алюминий
Стоимость	Доступный материал	Немного дороже алюминия

Анализируя результаты моделирования, мы можем прийти к выводу, что оба материала имеют отличные характеристики, и вполне подходят для изготовления ОХЧ, но ввиду большей сопротивляемости внешним нагрузкам, мы можем постараться сделать конструкцию, еще более облегченной, и проанализировать полученные данные.

В процессе подбора оптимальной толщины, способной сопротивляться нагрузке на протяжении всех этапов жизни РН, было решено сократить толщину обшивки на треть, но в процессе моделирования стало ясно, что в таком случае она не способна выдержать нагрузку равную 2046181 Н (максимальная перегрузка испытываемая РН во время полета, приложенную по направлению

вдоль внешней части обшивки). Но в случае, если, сократить лишь толщину обшивки, не касаясь ребер жесткости мы получаем еще более облегченную модель, обладающую необходимыми прочностными характеристиками.

### 6.5 Построение модели на основе полученных данных и ее анализ

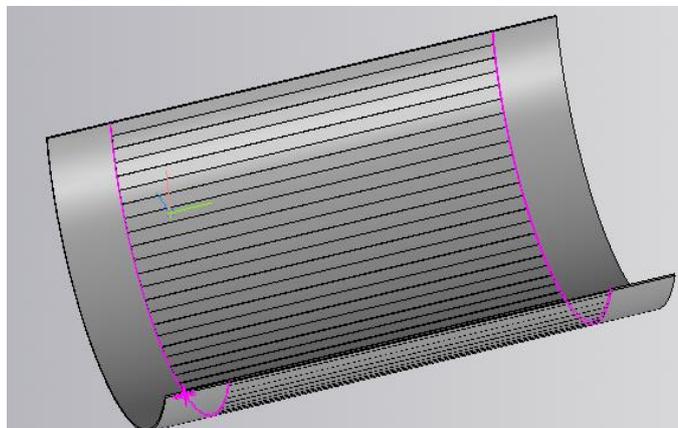


Рисунок 12 – Модель построенная на основе полученных

Используя те же данные, что и в прошлый раз, импортируем в COMSOL Multiphysics и проводим моделирование:

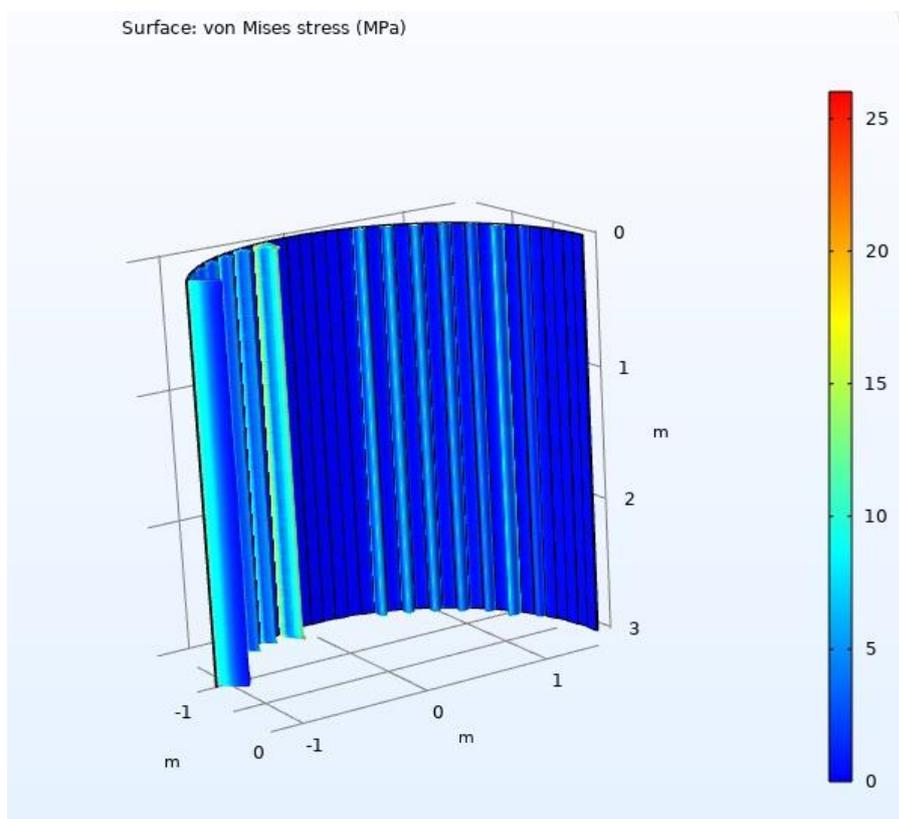


Рисунок 13 – Полученные результаты

### 6.5.1 Анализ полученных данных

На представленном графике, рисунок – 10, изображена зависимость напряжения ( $\sigma$ ) от деформации ( $\epsilon$ ) для композитного материала на основе стекловолокна и полиэфирной смолы.

Описание графика:

- Тип кривой: Кривая имеет нелинейный характер, что свидетельствует о нелинейной зависимости между напряжением и деформацией. В начальной области кривой наблюдается линейный участок, что указывает на упругую деформацию материала. При дальнейшем увеличении нагрузки кривая отклоняется от прямой, что свидетельствует о наступлении пластической деформации;

- Предел прочности: Предел прочности составляет около 100 МПа. Это значительно больше, чем у многих других материалов, таких как сталь (200-250 МПа) или алюминий (150-200 МПа);

- Модуль упругости: Модуль упругости составляет около 3,5 ГПа. Это говорит о высокой жесткости материала, что делает его подходящим для использования в конструкциях, где важна сохранение формы под нагрузкой;

- Деформация при разрушении: Деформация при разрушении составляет около 2,5%. Это значит, что перед разрушением композит может удлиняться на 2,5% своей исходной длины.

Обсуждение:

- Высокий предел прочности делает композит на основе стекловолокна и полиэфирной смолы подходящим материалом для изготовления конструкций, которые подвергаются высоким нагрузкам;

- Высокий модуль упругости обеспечивает сохранение формы конструкции под нагрузкой;

- Деформация при разрушении показывает, на сколько может удлиняться композит перед разрушением. Это важно учитывать при проектировании конструкций.

Следует отметить:

График представляет собой усредненные данные для композита на основе стекловолокна и полиэфирной смолы. Реальные характеристики материала могут отличаться.

Плотность алюминиевого сплава АМг6, из которого сделаны ОЧ составляет  $2\ 640\ \text{кг/м}^3$ , выше мы рассчитали примерный вес одной из трех секции, и получили значение равное 1109кг, но учитывая ее ребристую структуру и утолщения на концах, умножаем получившееся число на 1.5, и получаем значение равное 1715 кг. В процессе моделирования удалось узнать, что конструкция, сделанная из композита, имеет плотность меньшую более чем в полтора раза, в следствии чего и вес примерно равный 1150 кг, он может варьироваться в зависимости от соотношения композита к смоле.

Был проведен ряд моделирований ОЧ из композита, по итогам которых стало ясно, что толщину обшивки, не учитывая ребра жесткости, можно сократить на треть. ОЧ при этом сохраняет определенный запас прочности, и способность выдерживать нагрузку равную 4905 т (48570 кН), (максимальная перегрузка испытываемая РН во время полета, приложенную по направлению вдоль внешней части обшивки). Расчет нагрузки, испытываемой ракетой "Союз 2.1б" в момент взлета: профессиональный подход

Вес отделяемой части при этом становится еще меньше и по примерным расчетам масса одной подобной створки будет в районе 1000 кг. Это является хорошим результатом, в сравнении с традиционными материалами.

Определение нагрузки, испытываемой ракетой "Союз 2.1б" в момент взлета, представляет собой комплексную инженерную задачу, требующую учета множества взаимосвязанных факторов.

Для точного вычисления используются специализированные программные комплексы и методы моделирования, разработанные с учетом принципов аэродинамики, механики и теории управления.

Тем не менее, существуют приближенные методы расчета, позволяющие получить оценку примерной нагрузки для понимания физических процессов, происходящих при взлете ракеты. Один из таких методов основан на применении второго закона Ньютона:

$$F = m \cdot a, \quad (4)$$

где:  $F$  – сила, действующая на объект (в данном случае, ракета);

- $m$  – масса объекта;
- $a$  – ускорение объекта;

В момент взлета на ракету действуют следующие силы:

- Сила тяги двигателей: двигатель РД-107А, используемые на первой ступени, развивают тягу до 806 тс (7940 кН);
- Сила тяжести: Земное притяжение действует на ракету, стремясь вернуть ее на землю.

Ускорение ракеты можно приближенно рассчитать по формуле:

$$a = g - g_0, \quad (5)$$

где:  $g$  – ускорение свободного падения на Земле ( $9,81 \text{ м/с}^2$ );

$g_0$  – потери ускорения из-за сопротивления воздуха.

Потери ускорения из-за сопротивления воздуха зависят от скорости и формы ракеты, а также от плотности воздуха.

В первом приближении можно принять  $g_0 = 0$ .

Подставив эти значения в формулу  $F = ma$ ,

можно получить приближенную оценку максимальной нагрузки, испытываемой ракетой "Союз 2.1б" в момент взлета:

$$F \approx m \cdot g, \quad (6)$$

где:  $m$  – масса ракеты (около 500 т).

Таким образом, максимальная нагрузка в момент взлета составляет приблизительно 4905 т (48570 кН).

Следует отметить, что это лишь приближенная оценка, и реальная нагрузка может отличаться в зависимости от указанных выше факторов.

## 7 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Производство ОЧ РН из композита основой которого являются полиэфирные смолы сопряжено с рядом специфических опасностей, поэтому обеспечение безопасности труда является крайне важной задачей, затрагивающей многие разделы, такие как: общая безопасность, производственная безопасность, безопасность труда в особых условиях. Ниже все будет подробно рассмотрено.

Основными вредоносными факторами являются:

- Шум от станков, инструментов, вентиляторов, миксеров, дробилок;
- Пыль от стеклопластика, наполнителей (мел, кварцевый песок), катализаторов;
- Вибрация от станков, инструментов, полировальных машин;
- Порезы, ушибы, переломы от инструментов, оборудования, падающих предметов;
- Последствия работы со смолами, растворителями, отвердителями и катализаторами: отравления, аллергические реакции, раздражение кожи, глаз, дыхательных путей, наркотическое действие дыхательных путей, канцерогенное действие;
- Возможность поражения высоковольтным напряжением, при работе с электрооборудованием;
- Пожароопасность, ввиду работы с парами, обладающими способностью к воспламенению.

Электрический ток наиболее опасен, он может привести к летальному исходу, небольшой разряд электричества может вызвать необратимые последствия для организма человека. Короткое замыкание или перегрузка электросети, в свою очередь, могут привести к пожару или взрыву, нанося ущерб имуществу. По этой причине электробезопасность первоочередная задача на любом предприятии и производстве.

## 7.1 Классификация помещений по электробезопасности

Помещения по классу электробезопасности делятся на три категории, в нашем случае оно будет классифицироваться как помещения с повышенной опасностью (ГОСТ 12.1.019-79):

- В помещения работают со смолами и есть возможность образования горючих газов или паров в воздухе;
- Формование проводится в высокотемпературном режиме для полимеризации смол, и ввиду этого температура воздуха в помещении постоянно или периодически превышает 35°C.

В помещениях данной категории возможно понижение электрического сопротивления изоляции под воздействием паров, пыли, токопроводящих жидкостей, высокой температуры или ряда других факторов.

Производственная деятельность в помещениях с повышенной опасностью (ПП) сопряжена с риском возникновения аварийных ситуаций и несчастных случаев. Для обеспечения безопасных условий труда необходимо строгое соблюдение норм и правил, регламентированных законодательством и инструкциями по охране труда.

Допуск к работе в ПП разрешен только лицам, прошедшим обучение и инструктаж по ТБ, медицинское освидетельствование, знание требований по охране труда, специфики ПП и выполняемых работ.

Лица, ответственные за безопасность, должны обладать соответствующей квалификацией и пройти аттестацию.

Перед началом работ необходимо:

- Провести осмотр рабочего места и убедиться в отсутствии опасных факторов;
- Проверить исправность оборудования, инструментов и средств индивидуальной защиты (СИЗ);
- Получить наряд-допуск на выполнение работ, если это требуется.

Во время работы:

- Соблюдать правила эксплуатации оборудования и инструментов;
- Применять СИЗ в соответствии с видом выполняемых работ;
- Не отвлекаться и не отвлекать других;
- Не выполнять работы в состоянии алкогольного или наркотического

опьянения.

По окончании работы:

- Привести в порядок рабочее место;
- Отключить оборудование.;
- Снять СИЗ;
- Сообщить руководителю о всех неисправностях и опасных

ситуациях, возникших во время работы.

Меры безопасности при работе с композитами, рассмотренными в ВКР:

- Запрещено пользоваться открытым огнем;
- Запрещено курить;
- Должны быть под рукой средства тушения пожара;
- Запрещено прикасаться к обнаженным проводам и оборудованию;
- Следует использовать инструмент с изолирующими ручками;
- Необходимо носить диэлектрическую обувь и коврики;
- Запрещено принимать пищу и напитки;
- Запрещено курить;
- Обязательно использование СИЗ (респираторов, перчаток, защитных

очков);

- Должна быть обеспечена вентиляция.

В помещениях с пониженной или повышенной температурой:

- Следует использовать соответствующую спецодежду и СИЗ;
- Необходимо соблюдать режим труда и отдыха.

Ответственность:

- Руководитель организации обязан обеспечить безопасные условия

труда в ПП.

- Лица, ответственные за безопасность, несут персональную ответственность за соблюдение требований ТБ.
- Работники, допустившие нарушения правил ТБ, могут быть привлечены к дисциплинарной ответственности.

Соблюдение правил и инструкций по охране труда является залогом безопасной работы в ПП. Профессиональный подход к обеспечению безопасности труда позволяет сохранить здоровье и жизнь людей, а также предотвратить аварии и производственные травмы.

## **7.2 Технические способы и средства защиты при работе с электрооборудованием**

Наиболее вредоносным фактором является высокое напряжение и электрооборудование, что может возникнуть при несоблюдении ТБ. В дальнейшем, эти аспекты будет рассмотрен подробнее.

Для обеспечения электробезопасности применяются Правила устройства электроустановок (ПУЭ) - главный документ, определяющий общие требования к проектированию, монтажу и эксплуатации электроустановок, в том числе требования к изоляции. Там рассматриваются следующие технические способы и средства: изоляция токоведущих частей; оградительные устройства; предупредительная сигнализация, блокировка, знаки безопасности; расположение на безопасной высоте; малое напряжение; защитное заземление, зануление и защитное отключение; выравнивание потенциалов; электрическое разделение сетей; средства защиты и предохранительные приспособления.

Исправная изоляция является основным условием, обеспечивающим безопасность эксплуатации электроустановок. ГОСТ 1516.3-96 "Требования к электрической прочности изоляции электрооборудования" - устанавливает нормы испытательного напряжения и сопротивления изоляции для различных типов электрооборудования.

В силовых и осветительных сетях напряжением до 1000 В, в нашем случае 220 В, величина сопротивления изоляции между любым проводом и землей, а

также между двумя проводниками, измеренная между двумя смежными предохранителями или двумя последними предохранителями, должна быть не менее 0,5 МОм, существуют нормы на качество изоляции отдельных электроустановок.

Технические способы и средства защиты при работе с электрооборудованием:

1. Двойная изоляция — это электрическая изоляция, состоящая из рабочей и дополнительной изоляции;
2. Оградительные устройства;
3. Блокировочные устройства;
4. Предупредительная сигнализация, надписи, плакаты;
5. Размещение токоведущих частей на недоступной для прикосновения высоте;
6. Электрическое разделение сети. На отдельные электрически не связанные между собой участки электрическую сеть делят с помощью разделяющего трансформатора.

Раздельное питание используют в установках напряжением до 1000 В, в нашем случае 220 В, при испытаниях, работах с переносными электрическими приборами, на стендах и в особо опасных помещениях. Заземления корпуса электроприемника, присоединенного к разделяющему трансформатору, не требуется, а соединение его с сетью зануления не допускается.

Одной из наиболее эффективных мер защиты от опасности поражения током в случае прикосновения к металлическим нетоковедущим частям электроустановок, оказавшимся под напряжением, является защитное заземление.

Аппаратами защиты могут быть: плавкие предохранители, максимальные автоматы защиты от токов короткого замыкания и др.

Средства индивидуальной защиты (СИЗ) при работе с электрооборудованием средства

СИЗ при работе с электрооборудованием должны соответствовать:

- Типу электроустановки;
- Виду выполняемых работ;
- Условиям работы.

К основным видам СИЗ при работе с электрооборудованием относятся:

- Диэлектрические перчатки;
- Диэлектрические боты;
- Диэлектрические очки и щитки;
- Диэлектрические коврики;
- Изолирующие штанги и клещи.

Лишь сочетание всех вышеперечисленных технических способов защиты и применения СИЗ позволит создать безопасные условия труда при работе с электрооборудованием. Важно, чтобы все используемые средства защиты соответствовали действующим ГОСТам и правильно подбирались для конкретных условий работы.

### **7.3 Расчет заземления**

Зануление необходимо применять во всех высоковольтных электроустановках с глухозаземленной нейтралью. Зануление электроустановок следует выполнять при тех же номинальных напряжениях и в помещениях, в которых предусмотрено защитное заземление. Занулению подлежат те же металлические нетоковедущие части электрооборудования, которые подлежат защитному заземлению. Ниже, для наглядности, рассмотрен пример расчета заземления, с опорой на ПУЭ-7: "Правила устройства электроустановок" (7-е издание).

Расчет заземления — это многоэтапный процесс, который позволяет определить необходимые параметры системы заземления для обеспечения электробезопасности.

Расчет заземляющих устройств необходимо проводить в соответствии с:

- ГОСТ Р 50571.1-2019: "Заземляющие устройства. Нормы и требования";
- ГОСТ Р 50571.2-2019: "Заземляющие устройства. Методы измерения сопротивления заземлителей";
- ГОСТ Р 50571.6-2019: "Заземляющие устройства. Требования к защитным проводникам".

1. Отталкиваясь от приведенной выше документации, проведем расчет сопротивления одиночного вертикального электрода:

$$R = \rho * (l / d) + \rho_s * (0.5 * \ln(l / d) + 0.8) \quad (5)$$

где: R – расчетное сопротивление одиночного вертикального электрода, Ом;

$\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом\*м;

l – длина электрода, м;

d – диаметр электрода, м;

$\rho_s$  – справочное сопротивление растекания тока из заземлителя, Ом.

2. Расчет сопротивления горизонтального электрода:

$$R = \rho * (l / b) * [1 + (0.36 * \ln(l / b) + 0.05)] \quad (6)$$

где: R - расчетное сопротивление горизонтального электрода, Ом;

$\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом\*м;

l – длина электрода, м;

b – глубина заложения электрода, м.

3. Расчет сопротивления заземляющей сети:

$$R = \rho * (\Sigma l / \Sigma b) * [1 + (0.36 * \ln(\Sigma l / \Sigma b) + 0.05)] \quad (7)$$

где: R – расчетное сопротивление заземляющей сети, Ом;

$\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом\*м;

$\Sigma l$  – суммарная длина электродов сети, м;

$\Sigma b$  – суммарная глубина заложения электродов сети, м.

4. Расчет расстояния между электродами:

$$d = 5 * \sqrt{(\rho * R)} \quad (8)$$

где:  $d$  – минимальное расстояние между электродами, м;

$\rho$  – удельное сопротивление грунта, Ом\*м;

$R$  – расчетное сопротивление заземлителя, Ом.

Важно отметить, что эти формулы являются упрощенными и не учитывают все факторы, влияющие на сопротивление заземления.

Для более точного расчета рекомендуется использовать специальные программы или обращаться к квалифицированным специалистам.

Пример расчета:

Рассчитать сопротивление одиночного вертикального электрода, если:

- Удельное сопротивление грунта  $\rho = 100$  Ом\*м;
- Длина электрода  $l = 5$  м;
- Диаметр электрода  $d = 0.02$  м.

Решение:

$$R = 100 * (5 / 0.02) + 100 * 0.5 * (\ln(5 / 0.02) + 0.8) \approx 394.6 \text{ Ом}$$

Сопротивление одиночного вертикального электрода составляет 394.6 Ом.

Важно помнить, что расчет заземления – это важный этап обеспечения электробезопасности. Необходимо подходить к нему с ответственностью и соблюдать все требования ГОСТа.

ГОСТы являются исчерпывающим источником информации и рекомендаций о потенциальных опасностях на производстве, мерах защиты и требованиях к обеспечению безопасных условий труда. При их соблюдении риск получения травм будет минимален.

## 8 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данной главе будет проведена экономическая составляющая выпускной квалификационной работы, а именно расчет себестоимости проектирования воздушного фильтра и его испытания.

Производственная себестоимость изделия определяется по статье калькуляции, точным методом на основе нормативов использованных материальных и трудовых затрат, связанных с процессом производства продукции. В общем виде, расчет производственной себестоимости производится по следующей формуле:

$$C = П + L_0 + L_д + L_{сн}. \quad (9)$$

где П – затраты на ПО;

$L_0$  – основная заработная плата;

$L_д$  – дополнительная заработная плата;

$L_{сн}$  – отчисления на социальные нужды.

### 8.1 Покупка программного обеспечения (ПО)

Пакет включает MATLAB, КОМПАС-3D, SolidWorks и 21 наиболее широко используемых дополнительных продуктов, а также встроенную поддержку для создания прототипов, тестирования и запуска моделей на недорогом целевом оборудовании.

Набор для студентов MATLAB, КОМПАС 3-Д и COMSOL Multiphysics включает в себя:

Для КОМПАС 3-Д

- Система трехмерного моделирования КОМПАС-3D, включая приложения, разработанные компанией АСКОН;

- Система для проектирования по технологии информационного моделирования (BIM) Renga;
- Система фотореалистичного рендеринга Artisan Rendering;
- Система прочностного анализа АРМ FEM;
- САПР технологических процессов ВЕРТИКАЛЬ;
- Система управления инженерными данными ЛОЦМАН:PLM;
- Корпоративная система управления проектной организацией Pilot-ICE Enterprise;
- Система управления корпоративным контентом Pilot-ECM;
- Система хранения данных и организации коллективной работы инженеров 3D-Storage;
- Корпоративный справочник Материалы и Сортаменты;
- Расчетно-информационная система Электронный справочник конструктора;
- Комплект C3D Toolkit для разработки инженерного программного обеспечения.

## MATLAB

Для COMSOL Multiphysics Управление инженерными данными (COMSOL Multiphysics Enterprise PDM).

- Инженерные расчёты (COMSOL Multiphysics) ;
- Электротехническое проектирование (COMSOL Multiphysics);
- Разработка интерактивной документации (COMSOL Multiphysics);
- Механообработка, ЧПУ (CAMWorks);
- Верификация УП (CAMWorks Virtual Machine).

Таким образом, затраты на ПО составили П= 13 317 у.е.

## 8.2 Основная заработная плата

Основная заработная плата будет рассчитываться для специалиста проектировщика. Трудоемкость проектирования составляет 150 часа, которые понадобятся сотруднику, чтобы спроектировать модель, сделать чертежи и

провести ее испытания. Специалист имеет часовую тарифную ставку 425 у.е.

Отталкиваясь от этого, произведем расчет заработной платы:

$$L_0 = 1,25 \cdot t_{\text{изд}} \cdot e, \quad (10)$$

где 1,25 – коэффициент, учитывающий премии;

$t_{\text{изд}}$  – трудоемкость проектирования схемы;

$e$  – тарифная ставка за час работы.

Отсюда следует, что заработная плата специалиста второго разряда составляет:

$$L_0 = 1,25 \cdot 1504 = 79\,687 \text{ у.е.},$$

Также необходимо учитывать дополнительную заработную плату рабочим, которая составляет 12% от основной заработной платы. В данном случае дополнительная заработная плата специалиста второго разряда составляет:

$$L_{\text{д}} = 0,12 \cdot L_0 = 9\,562 \text{ у.е.} \quad (11)$$

### 8.3 Страховые взносы

Любой работодатель каждый месяц платит различные страховые взносы с выплат своим сотрудникам. Если они работают по трудовому договору, то это взносы: на обязательное пенсионное страхование; на обязательное медицинское страхование; на социальное страхование от болезней и травм или по материнству; на страхование от несчастных случаев и профессиональных заболеваний.

На 2024 год по основному тарифу на обязательное пенсионное страхование идет 22% от зарплаты, на медицинское страхование – 5,1%, в ФСС – 2,9%. В сумме – 30%. Тогда отчисления на социальные службы специалисту второго

разряда составляют:

$$L_{\text{CH}} = (L_{\text{д}} + L_0) \cdot 0,3 = 26774 \text{ у. е.}, \quad (12)$$

Рассчитав все величины, входящие в формулу 7, определим себестоимость проделанной работы:

$$C = 13\,317 + 79\,687 + 9\,562 + 26774 = 129\,340 \text{ у. е.}$$

В данной главе был произведен экономический расчет себестоимости проектирования ОХЧ РН. Сумма получена с учетом оплаты трудовых затрат составила 129 340 у.е.

#### **8.4 Расчет затрат на создание опытного образца**

Также рассчитаем стоимость примерную стоимость материалов для производства одной отделяемой створки, вес, который составляет примерно 700 кг.

##### **1. Материалы:**

- **Стекловолокно:** Стоимость стекловолокна зависит от типа и плотности. В среднем она составляет 50-100 у.е./кг. Для ОХЧ весом 900 кг потребуется приблизительно 2100 кг стекловолокна, что составит 105 000 - 210 000 у.е.;

- **Полиэфирная смола:** Стоимость полиэфирной смолы также зависит от типа и качества. В среднем она составляет 50-100 у.е./кг. Для ОХЧ весом 900 кг потребуется приблизительно 1400 кг смолы, что составит 70 000 - 140 000 у.е.;

- **Дополнительные материалы:** Разделители, гели для снятия формы, укрепляющие элементы и другие материалы могут увеличить стоимость на 10 000 - 20 000 у.е.

##### **2. Работы:**

- **Изготовление формы:** Стоимость изготовления формы зависит от сложности конструкции ОХЧ и используемого метода. В среднем она составляет 200 000 - 500 000 у.е.;

- Формовка: Стоимость формовки зависит от размера и сложности ОХЧ, а также от количества слоев стекловолокна. В среднем она составляет 50 000 - 100 000 у.е.;

- Доработка и финишная обработка: Обрезка краев, шлифовка, нанесение защитного покрытия и другие работы могут увеличить стоимость на 20 000 - 50 000 у.е.;

Итого:

Приблизительная стоимость формовки ОХЧ из 3 слоев стекловолокна и полиэфирной смолы весом 700 кг составляет от 455 000 до 920 000

В общей сложности на проектирование с изготовлением опытного образца уйдет от 590 000 до 1 110 100 у.е.

Цена алюминия меняется в зависимости от рыночных условий, но в 2024 году она составляет около 254 800 у.е. за 1000кг. Масса отделяемой части РН "Союз 2.1б" составляет около 5 тонн. Стоимость обработки алюминия зависит от сложности технологического процесса и может варьироваться от нескольких сотен до нескольких тысяч долларов за тонну. В стоимость производства также необходимо включить расходы на транспортировку, электроэнергию, рабочую силу и другие затраты.

Учитывая эти факторы, можно сделать приблизительный вывод, что стоимость производства отделяемой части второй ступени РН "Союз 2.1б" из алюминия может составлять от 1 400 000 у.е. до 3 500 000 у.е.

Важно отметить, что это лишь приблизительная оценка, и реальная стоимость может быть значительно выше или ниже.

Для получения более точной оценки необходимо иметь доступ к конфиденциальной информации о стоимости материалов и технологических процессах производства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы было проведено моделирование в программе в COMSOL Multiphysics. Анализ модели отделяемой хвостовой части с изменением геометрических характеристик и используемых материалов.

На основе проведенного сравнительного анализа разработанных 3D моделей, можно сделать следующие выводы:

1. Использование композиционного материала на основе стекловолокна позволяет снизить массу конструкции примерно в полтора раза, это соотношение может варьироваться в зависимости от соотношения композита к смоле.

2. При моделировании ОЧ из композита, расчетный запас прочности составляет 100 МПа, это значительно больше, чем у многих других материалов, таких как сталь (200-250 МПа) или алюминий (150-200 МПа). Композит способен выдерживать нагрузку равную приблизительно 4905 т (48570 кН), (максимальная перегрузка испытываемая РН во время полета, приложенную по направлению вдоль внешней части обшивки.).

3. Масса отделяемых створок из композиционного материала позволяет экономить массу конструкции до 2 тонн, что можно использовать для увеличения массы полезной нагрузки, выводимой на орбиту.

4. Были проанализированы методы изготовления изготовления конструкции. Наиболее выгодным способом производства и формовки является прессование.

5. Проведен подбор материалов для создания композита: ненасыщенные полиэфирные смолы, как самые распространенные смолы в ракетостроении. Они отличаются доступной ценой, простотой использования и высокой прочностью. Использовать можно такие марки как: ПН-1, ПН-2, ПН-6. В качестве наполнителя используется стекловолокно е-стекло (E-glass), как

наиболее распространенный тип стекловолокна в ракетостроении. Он отличается высокой прочностью, легким весом и доступной ценой. Использовать можно такие марки как: ЭС-1, ЭС-2, ЭС-3.

6. Проведена оценка безопасной работы с композиционными материалами на основе полиэфирных смол на этапе производства и переработки. Преимуществом эксплуатации готовых изделий является их малая химическая активность.

7. Проведен экономический расчет изготовления конструкции из стеклопластика, на проектирование с изготовление опытного образца составит от 590 000 до 1 110 100 у.е. В свою очередь стоимость изготовления ОЧ из алюминия может составлять от 1 400 000 у.е. до 3 500 000 у.е. Важно отметить, что это лишь приблизительная оценка, и реальная стоимость может быть значительно выше или ниже. Для получения более точной оценки необходимо иметь доступ к конфиденциальной информации о стоимости материалов и технологических процессах производства.

8. На основании проделанной работы и полученных теоретических данных можно сделать вывод, что композит может являться заменой для традиционно используемым материалам, благодаря ряду преимуществ, описанных выше.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Корнилова, Л.И. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Вязущие вещества». Испытание органических вязущих веществ / Л.И. Корнилова – Казань, КазГАСУ; 2008, –18с.
- 2 ГОСТ 10587–84 Смолы эпоксидно-диановые. Неотвержденные. Москва:издательство стандартов.
- 3 ГОСТ 56785-2015 Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов.
- 4 Васильев, В.В. Механика конструкций из композиционных материалов/ В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
- 5 Михеев, С.В. Керамические и композиционные материалы в авиационной технике. / С.В. Михеев, Г.Б. Строганов, А.Г. Ромашин –М., Альтекс, 2002, – 276 с.
- 6 Бондалетова Л.И. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
- 7 ГОСТ 12.4.011-89. ССБТ. Средства защиты работающих. – М.:
- 8 ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
- 9 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – М.: Минздрав России, 2003. – 56 с.
- 10 Афонин О. Д. Лабораторный практикум по прикладной механике: учебное пособие / О. Д. Афонин, А. Н. Луцко, М. Д. Телепнев, О. В. Сташевская; под ред. Н. А. Марцулевича. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2021. – 144 с.