

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

Зав. кафедрой

 В.В. Соловьёв  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Выбор оптимального материала для изготовления топливного бака универсального ракетного модуля первой ступени ракет-носителей семейства «Ангара»

Исполнитель  
студент группы 1109-об1

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

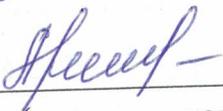
В.В. Сундеева

Руководитель  
доцент, канд. техн. наук

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

В.В. Соловьёв

Консультант  
доцент, канд. техн. наук

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль  
старший преподаватель СиТРК

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

М.А. Аревкин

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

Зав. кафедрой

  
\_\_\_\_\_ В.В. Соловьёв  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

### ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Сундеевой Виталии Витальевны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Выбор оптимального материала для изготовления топливного бака универсального ракетного модуля первой ступени ракет-носителей семейства «Ангара»

(утверждена приказом от 03.04.2025 № 878-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта): 06.06.2025

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

4. Содержание выпускной квалификационной работы: общие сведения о топливных баках и материалах, проектирование криогенного топливного бака, расчет массовых и прочностных характеристик материалов, проверка прочности и теплопередачи материалов, безопасность и экологичность, экономическая часть

5. Перечень материалов приложения: титульный лист, сборка бака, выбор материала для углепластика, массовые характеристики, прочностные характеристики, проверка на прочность, теплообмен материалов, стоимость материалов, заключение

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

7. Дата выдачи задания: 29.05.2025

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

Задание принял к исполнению (дата):  29.05.2025

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 64 страниц, 18 рисунков, 23 таблиц, 21 источника.

### ТОПЛИВНЫЙ БАК, УНИВЕРСАЛЬНЫЙ РАКЕТНЫЙ МОДУЛЬ, АЛЮМИНИЙ, НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ, КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, УГЛЕПЛАСТИК, МАССОВЫЙ РАСЧЕТ, ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ

Целью работы является разработка методологии выбора оптимального материала для изготовления топливного бака универсального ракетного модуля первой ступени ракет-носителей семейства «Ангара», обеспечивающего максимальную надежность, минимальные массогабаритные характеристики и экономическую эффективность при сохранении требований безопасности.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- Провести обзор современных материалов, применяемых в производстве криогенных топливных баков ракет-носителей.
- Оценить преимущества и недостатки каждого материала с точки зрения механических свойств, устойчивости к низким температурам, коррозионной стойкости и технологических характеристик обработки.
- Разработать математические модели для оценки прочностных характеристик и теплопередачи криогенных баков из различных материалов.
- Сравнить стоимость производства криогенных баков из разных материалов, учитывая затраты на сырье, обработку и монтаж.
- Обобщить результаты исследований и предложить рекомендации по выбору оптимального материала для криогенного топливного бака УРМ первой ступени ракет-носителей «Ангара».

## СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	7
Введение	8
1 Общие сведения о топливных баках и материалах	9
1.1 Назначение баков и требования, предъявляемые к ним	9
1.2 Семейство ракет-носителей семейства «Ангара»	11
1.2.1 Универсальный ракетный модуль	11
1.2.2 Жидкий кислород	13
1.3 Алюминий и алюминиевые сплавы	14
1.3.1 Свойства алюминия, полезные для топливных баков	14
1.3.2 Алюминиевые сплавы и их применение	14
1.4 Нержавеющая сталь	16
1.4.1 Физические и механические свойства нержавеющей стали	16
1.5 Композитные материалы	17
1.5.1 Состав и структура композитных материалов	17
1.5.2 Основные композиты, применяемые в ракетостроении	18
1.6 Сравнение материалов	19
2 Проектирование криогенного топливного бака	22
2.1 Составные части бака	22
2.1.1 Корпус	22
2.1.2 Днища	22
2.1.3 Стрингеры	23
2.1.4 Шпангоуты	24
2.2 Топливный бак в сборке	25
3 Выбор оптимальных материалов	26
3.1 Композиционные материалы	26
3.1.1 Расчет характеристик материалов, сочетаемых с углепластиком	28
4 Расчет массовых и прочностных характеристик, выбранных материалов	32
4.1 Массовый расчет	32
4.2 Прочностной расчет	33
5 Проверка прочности и теплопередачи материалов	38

5.1 Проверка на прочность	38
5.1.1 Анализ результатов для алюминий-магниевого сплава серии 5083	39
5.1.2 Анализ результатов для нержавеющей стали серии 300	40
5.1.3 Анализ результатов для углепластика + вспененного алюминия	42
5.2 Проверка теплопередачи	43
6 Безопасность и экологичность	48
6.1 Пожароопасность углепластиков при создании криогенного топливного бака	48
6.1.1 Горючесть компонентов углепластика	49
6.1.2 Опасные факторы пожара	50
6.2 Расчет категории помещения по пожарной опасности	51
6.3 Меры противопожарной защиты	52
7 Экономическая часть	56
Заключение	61
Библиографический список	63

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

АМг – алюминий-магниевый сплав;

КА – космический аппарат;

ЛУ – лента углеродная;

ПДК – предельно допустимая концентрация;

РД – ракетный двигатель;

РКТ – ракетно-космическая техника;

РН – ракета-носитель;

СПГ – сварка трением с перемешиванием;

УРМ – универсальный ракетный модуль.

## ВВЕДЕНИЕ

Топливный бак ракет-носителей – это резервуар, предназначенный для хранения топлива, которое используется для работы двигательной установки ракеты.

Криогенный топливный бак – предназначен для хранения и подачи криогенного топлива, таких как жидкий кислород и водород. Их эксплуатация сопровождается с рядом технических трудностей, обусловленных сверхнизкими температурами, высоким давлением и агрессивной средой. Использование современных материалов позволяет значительно улучшить технико-экономические характеристики ракеты.

Выбор оптимального материала для топливного бака является актуальной проблемой, потому что необходимо оптимизировать конструкцию ракет-носителей семейства «Ангара» для увеличения массы выводимой полезной нагрузки. Он позволит снизить массу конструкции, повысить надежность и уменьшить производственные издержки.

# 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТОПЛИВНЫХ БАКАХ И МАТЕРИАЛАХ

## 1.1 Назначение баков и требования, предъявляемые к ним

Топливные отсеки представляют собой составной компонент в общей компоновке ракеты-носителя, занимающий зачастую до 70-80% длинного размера или всей конструкции ступени многоступенчатой ракеты. В связи с этим ключевым моментом при проектировании является выбор шкалы топливных баков и их пространственного расположения относительно других подсистем ракеты. Данная оптимизация обусловлена тем, что при заданном уровне топлива, форме баков и их взаимной ориентации оказывается положительное влияние на габаритные размеры ракеты в целом, определяющие ее баллистические и массово-энергетические характеристики.

В ракетостроении применяются основные два типа топливных баков, классифицируемые по характеру восприятия противоположного воздействия: несущие и несущие. Несущие топливные баки в силовой конструкции ракеты и являются конструктивными элементами, обеспечивающими восприятие внешних аэродинамических и инерционных сил, воздействующих на ракету в процессе полета. Данный тип баков, как правило, используется для хранения компонентов ракетного топлива (окислительного и горючего). Напротив, несущие баки размещаются внутри корпуса ракеты и не участвуют в восприятии внешнего вида. Их конструктивная прочность определяется, главным образом, требованиями по удержанию внутреннего избыточного давления, обусловленного приложениями и по передаче рабочего тела в двигательную установку. Таким образом, несущие баки включают исключительно функцию хранения рабочего тела и несущую силовую нагрузку из внешней среды.

Конструктивное исполнение топливных баков определило требования к компоновкам ракет-носителей, обусловленные тактико-техническими благополучием, и должно соответствовать следующему комплексу основных условий:

1. Аэродинамическая и баллистическая оптимизация: учитывая значительный объем, занимаемый топливными баками в общей конструкции ракет, их геометрическая форма должна быть сохранена для достижения высоких аэродинамических характеристик и обеспечения надежной траектории полета.

2. Минимизация смещения центральной массы: конструкция баков и их взаимное расположение должны обеспечивать минимальное перемещение центральной массы ракеты в процессе полета, сохраняя его в пределах допустимых показателей для обеспечения стабильности и управляемости.

3. Оптимизация массогабаритных размеров: при заданном уровне топлива, баки должны иметь минимальный запас массы, что происходит за счет использования высокопрочных и легких материалов с переменными значениями удельной прочности и удельной жесткости, выбора конструктивной схемы и применения обоснованных коэффициентов запаса устойчивости, обеспечения гарантированных коэффициентов запаса устойчивости, гарантированных резервов без остаточных деформаций под влиянием внешних и внутренних силовых факторов на всех элементах летательного аппарата и физических характеристиках.

4. Обоснование резервирования: Свободные объемы баков и гарантийные запасы топлива должны быть строго обоснованы на основе анализа режимов работы двигательной установки и условий полета.

5. Технологичность и простота изготовления: Конструкция баков должна обеспечивать простоту и технологичность изготовления, что приводит к снижению трудозатрат и стоимости производства.

6. Обеспечение заправки и подачи топлива: Конструкция баков должна обеспечивать батарею и удобную заправку топлива, требуемую повторную точность дозирования, переносимый слив топлива и, при необходимости, возможность запуска двигательной установки.

7. Надежность системы забора топлива: Топливные баки должны быть оснащены устройствами, обеспечивающими надежный забор топлива и минимизацию остатка недозабора.

8. Коррозионная стойкость: Конструкция баков должна быть устойчивой к коррозии, что особенно важно в случае длительного хранения ракеты в заправленном состоянии и при использовании агрессивных компонентов топлива.

## **1.2 Семейство ракет-носителей семейства «Ангара»**

Ключевой характеристикой «Ангары» является использование универсальных ракетных модулей (УРМ), оснащенных кислородно-керосиновыми двигателями.

В состав входят ракеты-носители, охватывающие широкий диапазон грузоподъемностей: от легкого класса «Ангара-1,2» (до 3,5 тонн) до тяжелого класса «Ангара-А5В» (до 38 тонн) при выведении на низкую околоземную орбиту (высота 200 км).

Важным преимуществом ракет-носителей «Ангара» является отказ от использования высокотоксичного гептила в качестве ракетного топлива. Переход к экологически более чистым компонентам повышает уровень безопасности, как в районе космодрома, так и в зонах падения отделяющихся частей ракеты-носителя.

Благодаря более широкой унификации и применению инновационных технических решений семейство «Ангара» позволяет исследовать запуски ракет различных грузоподъемностей с помощью стандартного стартового комплекса, что значительно ускоряет логистику и сокращает экономические затраты.

### **1.2.1 Универсальный ракетный модуль**

При разработке семейства ракет-носителей «Ангара» впервые реализован принцип модульности конструкции. Основой является универсальный ракетный модуль (УРМ). Первая и вторая ступени всех модификаций оснащены модулем УРМ-1, третья ступень – УРМ-2. Отличительной особенностью различных

версий ракеты («Ангара-1.2», легкая, и «Ангара-А5», тяжелая) является количество используемых ступеней и модулирующих элементов.

Универсальный ракетный модуль УРМ-1 состоит из нескольких ключевых компонентов:

Таблица 1 – Компоненты УРМ-1

Основные части	Предназначение, характеристика
Топливные баки	Имеет диаметр 2,9 м и длину 25,1 м. Бак разделён на две части: верхняя часть содержит жидкий кислород, нижняя – керосин
Двигатель РД-191	Однокамерный двигатель, работающий на жидком кислороде и керосине.
Система подачи топлива	Включает в себя турбонасосы, трубопроводы и клапаны, обеспечивающие подачу топлива и окислителя в камеру сгорания двигателя
Система управления вектором тяги	Позволяет изменять направление вектора тяги двигателя для корректировки траектории полёта ракеты. Система включает механические приводы и управляющие поверхности
Теплозащита	Специальные покрытия и материалы защищают модуль от высоких температур, возникающих при работе двигателя и прохождении через плотные слои атмосферы

Электронная система управления	Обеспечивает контроль над работой всех систем модуля, включая управление двигателем, подачей топлива и ориентацией ракеты
Интерцепторы и переходники	Используются для соединения модулей между собой и с другими элементами ракеты

### 1.2.2 Жидкий кислород

В качестве окислителя для ракетных топлив жидкий кислород давно привлек к себе внимание. Это произошло благодаря сравнительно высокой энергетической эффективности топлив на его основе. Температура кипения жидкого кислорода составляет 90 К, что соответствует примерно минус 183°С. Такие экстремально низкие температуры требуют специальных мер предосторожности при хранении и транспортировке. Высокая плотность энергии позволяет разместить большое количество топлива в ограниченном объеме ракеты.

Таблица 2 – Характеристика жидкого кислорода

Компонент	Жидкий кислород
Химическая формула	$O_2$
Плотность, $кг / м^3$	1142
$T_{кип}$ , К	90,18
$T_{плав}$ , К	54,36
Вязкость динамическая	0,02
Удельная теплоемкость, $кДж / (кг \cdot К)$	1,7
Коэффициент теплопроводности, $Вт / (м \cdot К)$	0,1935

## 1.3 Алюминий и алюминиевые сплавы

### 1.3.1 Свойства алюминия, полезные для топливных баков

Таблица 3 – Свойства алюминия

Свойство	Характеристика
Низкая плотность	почти в три раза легче стали, что позволяет значительно уменьшить массу ракеты
Высокая прочность	алюминиевые сплавы обладают высокой удельной прочностью при относительно малом весе
Коррозионная стойкость	важно при контакте с агрессивными компонентами ракетного топлива, такими как жидкий кислород или керосин
Технологичность	хорошо поддается сварке, механической обработке и формовке, что облегчает производство баков сложной формы

### 1.3.2 Алюминиевые сплавы и их применение

Сплавы на основе алюминия – одни из наиболее востребованных материалов в РКТ в силу сочетания высоких физико-механических свойств и удельных характеристик прочности, жесткости и др.

Сплавы на основе алюминия являются и останутся в перспективе основным материалом для корпусных узлов и силовых элементов космических аппаратов (КА), баков ракет-носителей (РН), приборов и др.

В ракетостроении используются в основном сплавы алюминия с магнием, медью, кремнием и литиевыми компонентами.

Таблица 4 – Примеры основных сплавов

Сплав	Особенность	Пример	Применение
Алюминий-магниевого сплавы (5xxx серия)	Высокая коррозионная стойкость, хорошая свариваемость.	5083	Используется для баков ракет, работающих в агрессивных средах и при низких температурах.
Алюминий-медные сплавы (2xxx серия)	Высокая прочность, но низкая коррозионная стойкость.	2024	Редко используется для топливных баков из-за ограниченной коррозионной стойкости, но применяется в конструктивных элементах.
Алюминий-литиевые сплавы	Обладают лучшей удельной прочностью, чем традиционные сплавы, и меньшей плотностью.	2195, 2090, 2050	Массово применяются в современных тяжелых ракетах, таких как SpaceX Falcon 9 и Delta IV.
Алюминий-кремниевые сплавы (6xxx серия)	Универсальные свойства, высокая прочность и хорошая стойкость к коррозии.	6061	Часто используются для изготовления трубопроводов и второстепенных элементов топливных систем.

Характеристики легирующих материалов приведены в таблице 3:

Таблица 5 – Характеристика легирующих материалов

Легирующий элемент	Плотность (г/см <sup>3</sup> )	Прочность (МПа)	Коррозионная стойкость	Рабочая температура (°С)
Магний	2.66	400	Высокая	-200 до +150

Литий	2.53	450	Средняя	-200 до +100
Медь	2.8	500	Низкая	-100 до +300
Кремний	2.7	550	Высокая	-50 до +200

Для криогенного топливного бака наиболее подходящим алюминиевым сплавом является сплав с магнием. Он обладает высокой коррозионной стойкостью и способен выдерживать экстремально низкие температуры до минус 200°С. Сплав с литием тоже обладает хорошими характеристиками, но его коррозионная стойкость ниже, что может быть недостатком в условиях длительного контакта с агрессивными средами. Сплавы с медью и кремнием не подходят для криогенных применений из-за ограниченной коррозионной стойкости и неспособности выдерживать очень низкие температуры.

#### **1.4 Нержавеющая сталь**

Нержавеющая сталь по-прежнему сохраняет важную роль в определенных ракетных системах. Это связано с уникальными свойствами нержавеющей стали: высокой прочностью, термостойкостью, устойчивостью к агрессивным средам и способностью выдерживать экстремальные условия эксплуатации, особенно при криогенных температурах.

На современном этапе разработки сверхтяжелых ракет и систем многократного использования вновь привели к возрождению интереса к нержавеющей сталям, как перспективному материалу для топливных баков.

##### **1.4.1 Физические и механические свойства нержавеющей стали**

Нержавеющая сталь, используемая в ракетостроении, преимущественно относится к аустенитным сталям серии 300.

Таблица 6 – Свойства Аустенитной нержавеющей стали серии 300

Свойство	Показатель
Плотность	7,93 г/см <sup>3</sup>

Прочность на растяжение	до 1000 МПа (в зависимости от термообработки)
Коррозионная стойкость	Отличная (особенно в окислительных средах)
Рабочие температуры	От -196°С до +870°С

Нержавеющая сталь серии 300 обладает уникальным свойством: при криогенных температурах ее прочность увеличивается, в отличие от многих других материалов, которые становятся хрупкими. Это делает ее идеальным материалом для баков, содержащих жидкий водород, жидкий кислород и другие компоненты криогенного топлива.

### 1.5 Композитные материалы

Современные технологии космического ракетостроения переживают значительную трансформацию благодаря внедрению композитных материалов в конструкции ключевых узлов и элементов, таких как топливные баки. Эта область является передовой не только в технологическом, но и экономическом плане, так как использование композитов позволяет существенно снизить массу ракеты, улучшить её характеристики и в конечном итоге повысить эффективность запуска.

#### 1.5.1 Состав и структура композитных материалов

Композитный материал состоит из двух основных компонентов:

Таблица 7 – Компоненты композитного материала

Компоненты	Группы	Характеристика
Матрица	Полимерные матрицы	связующее вещество, которое удерживает армирующие элементы и обеспечивает передачу нагрузки
	Металлические и керамические матрицы	

Армирующие волокна	Углеродные волокна	главный элемент, который придаёт композиту прочность и жёсткость
	Стекловолокно	
	Арамидные волокна (Кевлар)	

Сочетание этих компонентов позволяет создавать материалы с уникальными свойствами: лёгкостью, прочностью, устойчивостью к термическим и химическим воздействиям.

### 1.5.2 Основные композиты, применяемые в ракетостроении

Для создания топливных баков ракет используют различные композитные материалы:

Таблица 8 – Разновидности композиционных материалов

Вид композита	Характеристика
Углепластики	обладают высокой удельной прочностью и жёсткостью, а также хорошей стойкостью к воздействию агрессивных сред, таких как криогенное топливо
Стеклопластики	имеют хорошие прочностные характеристики и устойчивость к коррозии, однако они тяжелее углепластиков
Кевларовые композиты	известно своей высокой прочностью и ударостойкостью
Металлокомпозиты	обеспечивают отличную прочность и термостойкость

Полимерные композиты с керамическими наполнителями	позволяют создавать материалы с улучшенными теплоизоляционными свойствами
Композиционные материалы на основе бора	обладают высокой прочностью и стабильностью при высоких температурах, дорогие и сложные в производстве
Нанокompозиты	содержат наночастицы металлов, керамики или углерода, имеют повышенные механические свойства и устойчивость к износу

Каждый из этих материалов имеет свои преимущества и недостатки, поэтому выбор конкретного композита зависит от требований конкретной задачи и условий эксплуатации.

### 1.6 Сравнение материалов

Для оценки трех основных материалов – алюминия, нержавеющей стали и композитных материалов – представим сравнительный анализ по ключевым параметрам. Таблица содержит технические, экономические и эксплуатационные показатели, которые играют важную роль в выборе материала для изготовления топливного бака.

Таблица 9 – Сравнение материалов

Показатель	Алюминий	Нержавеющая сталь	Композитные материалы
Плотность материала (г/см <sup>3</sup> )	2.7	7.8	1.5–2.0 (углеродные композиты)
Прочность на растяжение (МПа)	300–600	600–900	1000–1500

Продолжение таблицы 9

Удельная прочность (прочность/плотность)	111–222	77–115	500–1000
Термостойкость	До 300°C	До 870°C	До 150–300°C
Стойкость к коррозии	Высокая при анодировании	Очень высокая	Высокая
Сопротивление к криогенным температурам	Удовлетворительное	Высокое	Высокое
Герметичность	Отличная	Отличная	Хорошая
Сложность обработки и изготовления	Легкая обработка и сварка	Средняя, требует спец. оборудования	Высокая, автоклав и укладка
Вес конструкции	Легкий	Тяжелее на 50–60%	Самый легкий (на 30–50% легче алюминия)
Стоимость материала	\$2–4 за кг	\$5–10 за кг	\$20–80 за кг
Стоимость изготовления	Средняя	Высокая	Очень высокая
Обслуживание и ремонт	Легкое	Среднее	Сложное
Применение в современных ракетах	Используется в Falcon 9, SLS	Использовалась в Saturn V, Starship	Rocket Lab Electron, экспериментальные баки
Экономическая целесообразность	Оптимальное соотношение цена/качество	Высокая прочность, но высокая масса	Дорого, но минимальный вес
Срок службы	Долгий	Очень долгий	Зависит от условий
Экологические аспекты	Перерабатывается	Перерабатывается	Ограниченная переработка

Таблица 10 – Анализ результатов

Материал	Преимущества	Недостатки
Алюминий	Низкая плотность, отличная герметичность, лёгкость обработки и относительно низкая стоимость	Ограниченная термостойкость и средняя стойкость к криогенным температурам
Нержавеющая сталь	Высокая прочность, термостойкость и отличная устойчивость к криогенным температурам	Высокая плотность, что увеличивает массу конструкции, и высокая стоимость обработки
Композитные материалы	Наилучшее соотношение прочности к массе, высокая стойкость к коррозии и минимальный вес конструкции	Высокая стоимость материалов и производства, сложность ремонта и проблемы герметизации при криогенных температурах

## 2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРИОГЕННОГО ТОПЛИВНОГО БАКА

Объектом проектирования был выбран криогенный топливный бак для универсального ракетного модуля первой ступени, состоящий из корпуса, днищ, стрингеров, шпангоутов.

### 2.1 Составные части бака

Рассмотрим каждую часть по отдельности:

#### 2.1.1 Корпус

Корпус топливного бака предназначен для размещения жидкого кислорода. Он выполнен в форме гладкой цилиндрической оболочки, длиной 9,2 м.

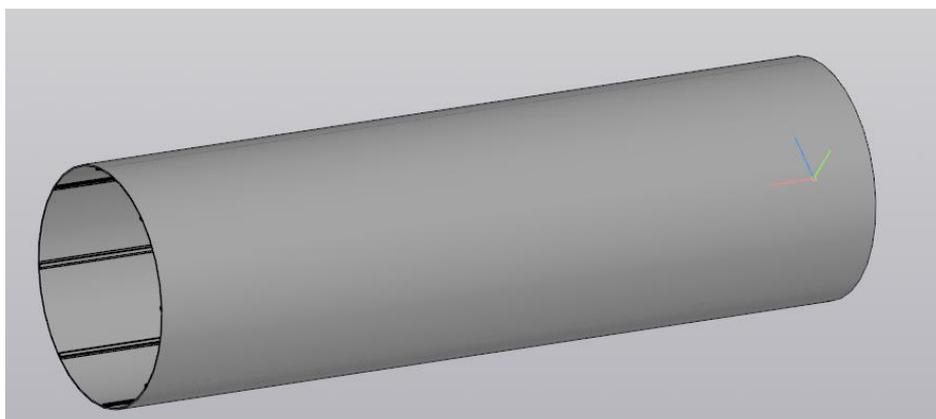


Рисунок 1 – Корпус топливного бака

#### 2.1.2 Днища

Днища представляют собой полусферы, радиусом 1,45 м, и обеспечивают герметичность бака для хранения топлива. Они прикрепляются к корпусу с использованием сварки трением с перемешиванием (СПГ). Этот тип сварки обеспечивает высокую прочность и герметичность соединения.

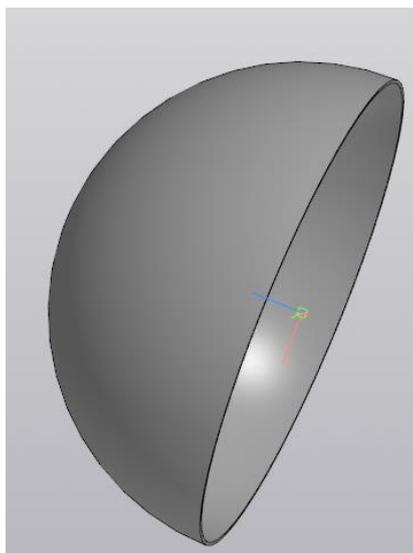


Рисунок 2 – Днище №1 и №2

### 2.1.3 Стрингеры

Стрингеры – это продольные ребра жесткости, которые устанавливаются вдоль стенок топливного бака. В баке должно присутствовать по меньшей мере два стрингера, причем стрингеры соединены с корпусом сваркой трением с перемешиванием. Поперечное сечение профиля стрингеров U-образное. [2]

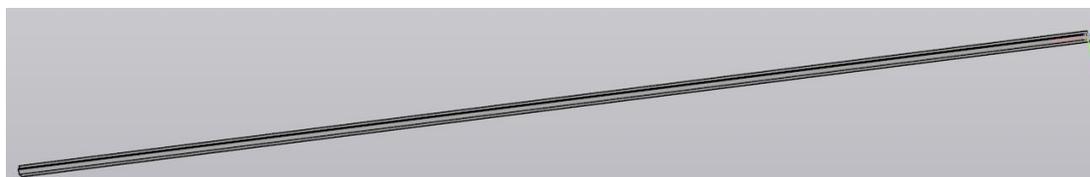


Рисунок 3 – Стрингер

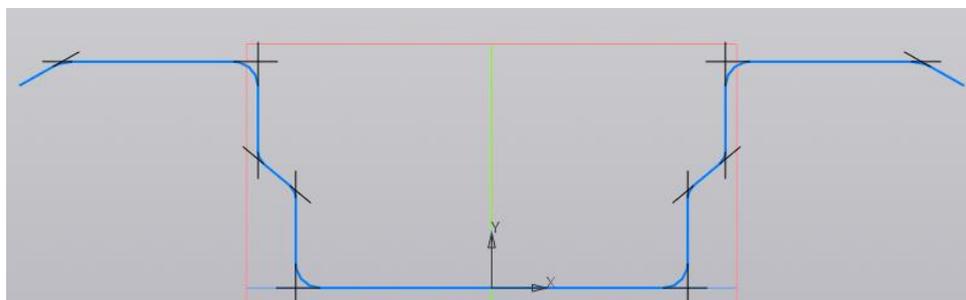


Рисунок 4 – Эскиз стрингера

## 2.1.4 Шпангоуты

Шпангоуты – это поперечные элементы жесткости, расположенные по окружности тела. В баке должен присутствовать по меньшей мере один шпангоут, расположенный по окружности корпуса с его внутренней стороны и перпендикулярно стрингерам. Выполняется механическое присоединение шпангоута к стрингерам. Поперечное сечение профиля шпангоутов – U-образное. [2]

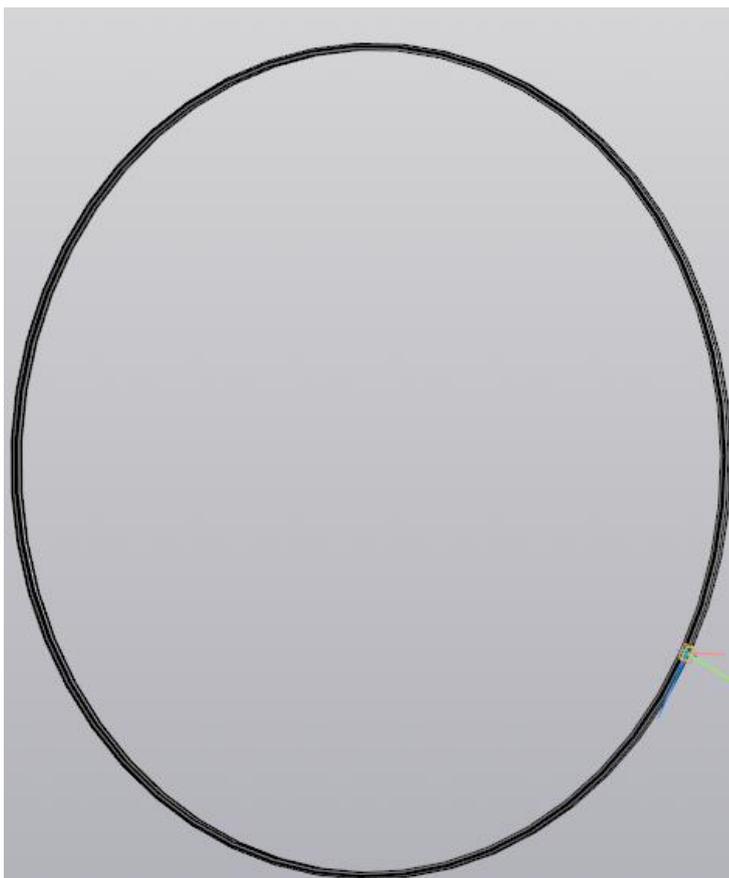


Рисунок 5 – Шпангоут

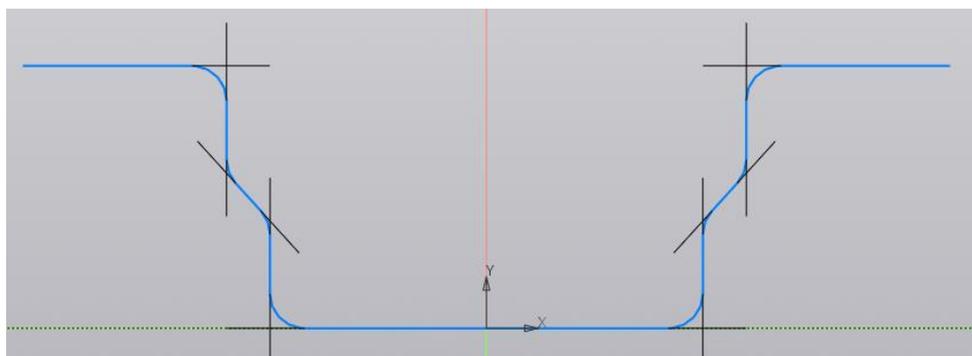


Рисунок 6 – Эскиз шпангоута

## 2.2 Топливный бак в сборке

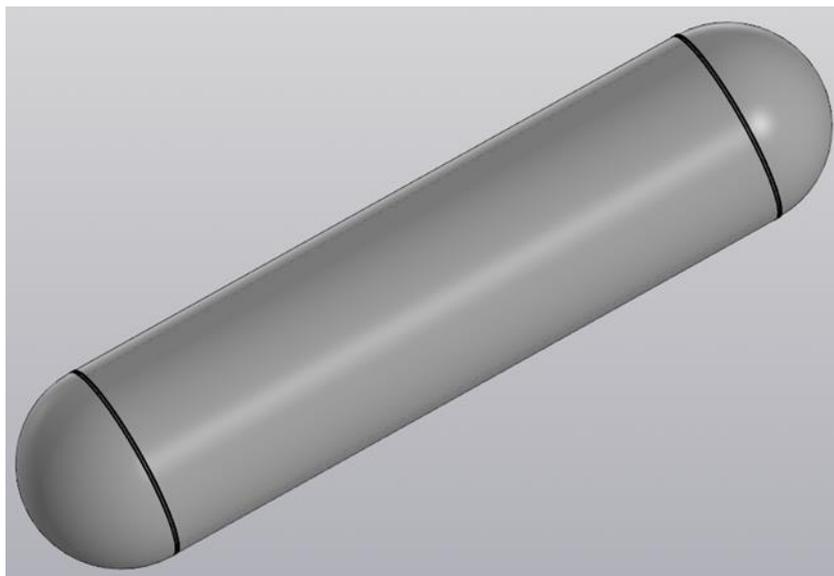


Рисунок 7 – Топливный бак для окислителя

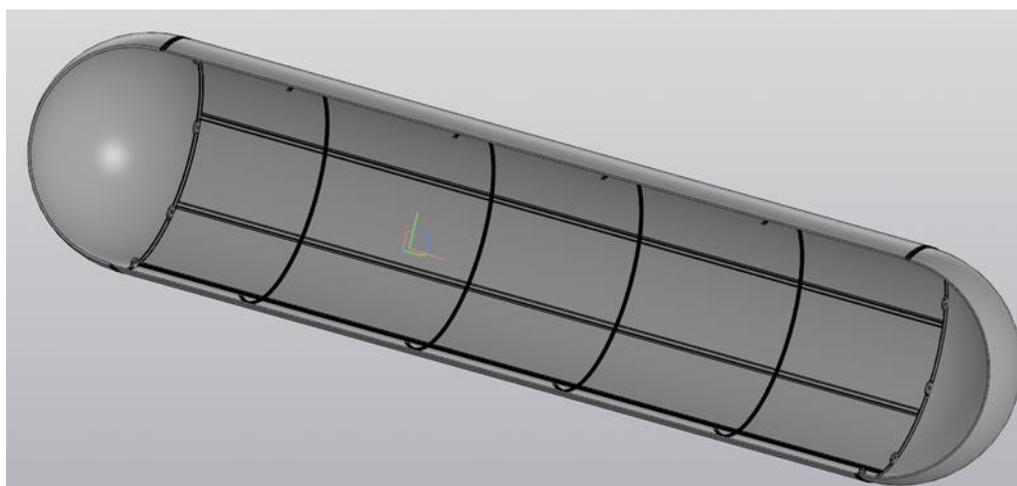


Рисунок 8 – Топливный бак в разрезе

### 3 ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Будут рассматриваться три основных типа материалов, которые могут быть использованы для изготовления криогенных топливных баков ракет-носителей семейства «Ангара»: алюминиевые сплавы, нержавеющая сталь и композиционные материалы. Эти материалы обладают преимуществами и недостатками, которые можно рассмотреть для применения в космической технике. Материалы, такие как титановые и никелевые сплавы, исключены из рассмотрения, ввиду их высокой стоимости, сложности обработки и большей плотности.

Анализируя данные, представленные в таблице 3, можно сказать, что для криогенного топливного бака наиболее подходящим алюминиевым сплавом является сплав с магнием.

Будем исследовать аустенитную сталь серии 300.

#### **3.1 Композиционные материалы**

Композиционные материалы, такие как углепластики, характеризуются крайне низкой плотностью и высокой удельной прочностью, что позволяет создавать лёгкие и прочные конструкции.

Для топливных баков с криогенными компонентами не вполне подходят существующие неметаллические материалы, т.к. они плохо работают в диапазоне низких температур, поэтому поиск новых материалов и сочетаний, имеющих в эксплуатации является актуальной задачей. [1]

Углепластик - это материал, который объединяет в себе два, на первый взгляд, противоположных качества: необычайную прочность и сверхлёгкость. Основным недостатком большинства углепластиков является потеря свойств в низком диапазоне температур. Углепластики КМУ-1л и КМУ-3л изготовлены на основе углеродной ленты ЛУ-3 и связующих (ЭТФ и 5-211Б), углепластик КМУ-4л - на основе волокна ЛУ-ПО,2 и связующего ЭНФБ, на основании чего для расчетов был выбран материал КМУ-1л. [1]

Таблица 11 – Основные характеристики углепластика КМУ-1л

Характеристика	Значение
Плотность	1.45–1.55 г/см <sup>3</sup>
Прочность на разрыв	900–1200 МПа
Коррозионная стойкость	Высокая (устойчив к большинству химических воздействий)
Рабочая температура	От -60°С до +80°С

Из-за того, что рабочая температура больше, чем положено для криогенного топливного бака, нельзя рассматривать углепластик в чистом виде. Поэтому нужно рассмотреть различные сочетания материалов: отдельно углепластик, АМг6 (относится к категории деформируемых алюминиевых сплавов) с углепластиком и вспененный алюминий (сплав ячеистой структуры, состоящей из твердого металла с заполненными газом порами) с углепластиком. [1].

Таблица 12 – Характеристики материалов для их сочетания

Параметры	Алюминиевый сплав АМг6	Углепластик КМУ-1л	Вспененный алюминий
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,64	1,50	0,2
Предел прочности, МПа	470	600	270

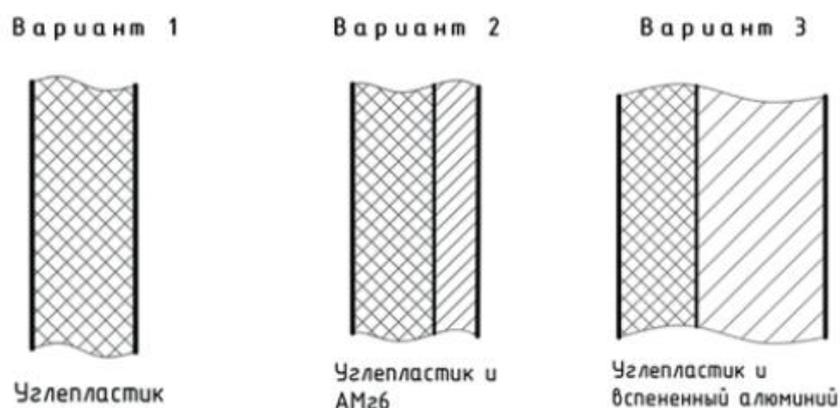


Рисунок 9 – Варианты комбинации

### 3.1.1 Расчет характеристик материалов, сочетаемых с углепластиком

Расчеты производились с помощью программного обеспечения MATLAB.

Алгоритм работы программы:

#### 1. Установка исходных данных:

Задаем размеры резервуара (диаметр, высота), физические свойства жидкостей и коэффициент безопасности.

Таблица 13 – Исходные данные программы

Исходные данные	Значение
Диаметр, м	2,9
Высота, м	12,6
Плотность жидкого кислорода, кг/м <sup>3</sup>	1142
Давление наддува, Па	200000
Коэффициент безопасности	1.5

#### 2. Свойства материалов

Определяет характеристики трех различных материалов (углепластик, алюминиевый сплав, вспененный алюминий). Для этого использовались основные входные данные, представленные в таблице 4.

#### 3. Допустимые напряжения

Для каждого материала определяют допустимую нагрузку с учётом коэффициента безопасности:

$$[\sigma] = \frac{\sigma}{f}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – предел прочности, определенного материала;

$f$  – коэффициент безопасности.

#### 4. Расчёт толщины стенок

Используя формулу Лапласа для тонкостенных сосудов под давлением, рассчитывается толщина стенок:

$$\delta = \frac{\Delta P \cdot R}{[\sigma]}, \quad (2)$$

где

$\Delta P = 0.2 \cdot 10^6 \text{ Па}$  – давление наддува;

$R = 1.45 \text{ м}$  – радиус бака.

### 5. Определение площади поверхности

Вычисляют суммарную площадь внутренней поверхности резервуара, состоящего из цилиндрической части и двух сферических днищ.

Площадь бака:

$$S_{cyl} = 2\pi RH, \quad (3)$$

$$S_{sph} = 2\pi R^2, \quad (4)$$

$$S = S_{cyl} + 2 \cdot S_{sph}, \quad (5)$$

где  $S_{cyl}$  – площадь цилиндрической части;

$S_{sph}$  – площадь сферического днища.

### 6. Расчёт объёма

Определяют объём резервуара путём суммирования объёмов цилиндрической части и двух полусферических днищ.

$$V = \pi \frac{D^2}{4} H + 2\pi \frac{D^3}{12} \quad (6)$$

## 7. Расчёт массы конструкции

Рассчитывается масса конструкции путем перемножения общей площади поверхности, толщины стенок и плотности материала.

$$M = \rho \cdot S \cdot \delta \quad (7)$$

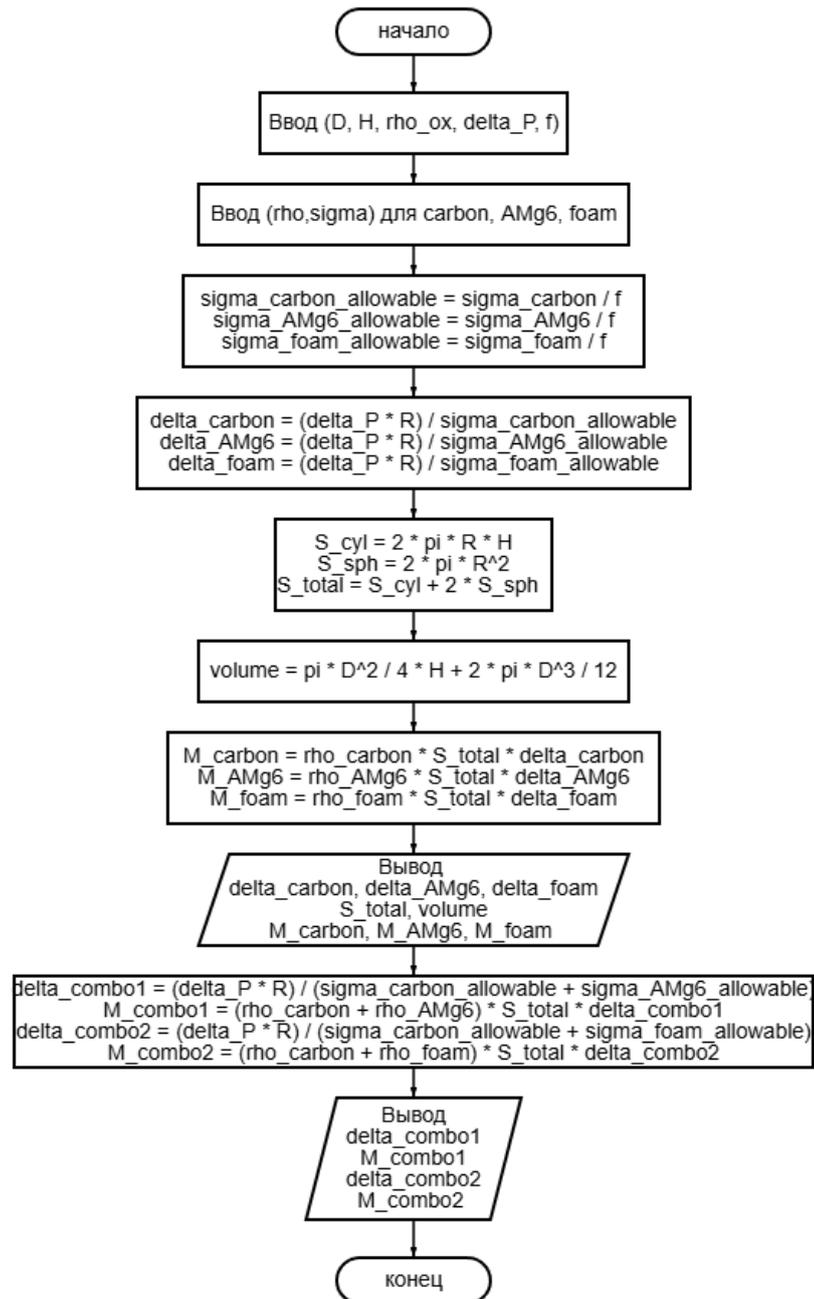


Рисунок 10 – Блок-схема программы массового расчета углепластика и выбор наилучшего сочетаемого материала

Таблица 14 – Результаты расчета сочетаний углепластика с другими материалами

Параметры	Углепластик	Углепластик + АМг6	Углепластик + вспененный алюминий
$\delta_{об}, м$	0,009	0,016	0,018
$M_{об}, кг$	2927	3254	2448
$S, м^2$	141,21	141,21	141,21
$V, м^3$	96,00	96,00	96,00

Наиболее перспективным варианта материала бака для жидкого кислорода является сочетание углепластика и вспененного алюминия.

## 4 РАСЧЕТ МАССОВЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ВЫБРАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 4.1 Массовый расчет

Массовый расчет предназначен для определения массы конструкции или её отдельных элементов.

Расчеты проводились с помощью программного обеспечения MATLAB. Алгоритм работы, исходные данные, результаты расчета выбранного материала (углепластик + вспененный алюминий) берем из пункта – 3.1.1 Расчет характеристик материалов, сочетаемых с углепластиком, так как происходил расчет этих же характеристик.

Для алюминий-магниевого сплава использовались характеристики из таблицы 3.

Для аустенитной нержавеющей стали серии 300 использовались характеристики из таблицы 4.

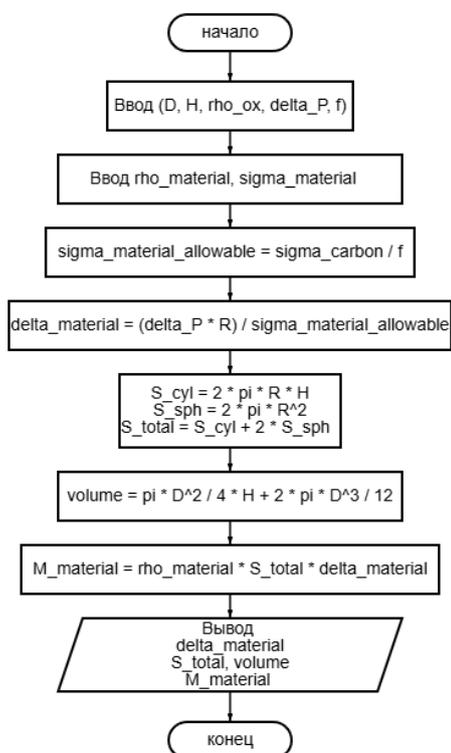


Рисунок 11 – Блок-схема программ расчета массовых характеристик алюминий-магниевого сплава и аустенитной нержавеющей стали серии 300

Вывод всех программ сведен в таблицу, для наглядности.

Таблица 15 – Результат расчета массовых характеристик для всех материалов

Параметры	Алюминиево-магниевый сплав	Нержавеющая сталь серии 300	Углепластик + вспененный алюминий
$\delta_{об}, м$	0,02	0,02	0,018
$M_{об}, кг$	4131	9712	2448
$S, м^2$	141,21	141,21	141,21
$V, м^3$	96,00	96,00	96,00

Наилучшим выбором будет углепластик + вспененный алюминий при условии, что он отвечает требованиям по прочности и безопасности для эксплуатации в криогенных условиях, благодаря:

- Самой низкой массе (практически в 1,7 раза легче алюминиево-магниевого сплава и в 4 раз легче нержавеющей стали).
- Наименьшей толщине стенки, что упрощает конструкцию.

#### 4.2 Прочностной расчет

Прочностной расчет используется для оценки способности конструкции выдерживать различные виды нагрузок (статические, динамические, температурные и др.) без разрушения или деформации сверх допустимых пределов. Расчеты производились с помощью программного обеспечения MATLAB.

1. Устанавливаем ключевые величины топливного бака: диаметр, длину, толщину стенки.

Таблица 16 – Исходные данные программы

Параметры	Значение		
	Алюминий-магниевый сплав	Нержавеющая сталь	Углепластик + вспененный алюминий
Радиус, м	1,45		
Высота, м	12,6		
Толщина стенки, м	0,02	0,02	0,018

2. Задаём модуль упругости, коэффициент Пуассона и предел текучести выбранных материалов.

Таблица 17 – Входные данные материалов

Параметры	Алюминиево-магниевый сплав	Нержавеющая сталь серии 300	Углепластик + вспененный алюминий
Модуль упругости, ГПа	70	200	300
Коэффициент Пуассона	0,33	0,3	0,3
Предел текучести, МПа	250	240	300

3. Расчёт максимума допустимого давления:

Применяется формула Барлоу для расчета максимально допустимого внутреннего давления:

$$P_{\max} = \frac{\sigma_{\text{yield}} \cdot t}{R \cdot SF}, \quad (8)$$

где  $P_{\max}$  – максимальное допустимое внутреннее давление (Па);

$\sigma_{yield}$  – предел текучести материала (Па);

$t$  – толщина стенки бака (м);

$R$  – радиус бака (м);

$SF$  – коэффициент безопасности.

#### 4. Проверка прочности:

Оцениваются напряжения в баке: в окружном направлении и вдоль оси, используя ранее определённые нагрузки и геометрию.

Окружное напряжение (напряжение в тангенциальном направлении):

$$\sigma_{hoop} = \frac{P_{\max} \cdot R}{t} \quad (9)$$

Продольное напряжение (напряжение вдоль оси бака):

$$\sigma_{longitudinal} = \frac{P_{\max} \cdot R}{2t} \quad (10)$$

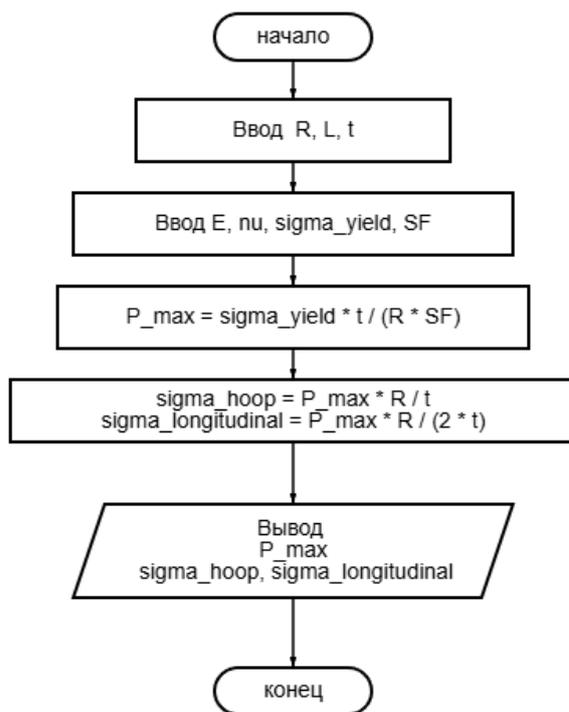


Рисунок 12 – Блок схема программ расчета прочностных характеристик алюминий-магниевого сплава, аустеритной нержавеющей стали серии 300, углепластик + вспененный алюминий

Таблица 18 – Результат расчета прочностных характеристик для всех материалов

Параметры	Алюминиево-магниевый сплав	Нержавеющая сталь серии 300	Углепластик + вспененный алюминий
Максимально допустимое внутреннее давление, кПа	2299	2207	2483
Напряжение в окружном направлении, МПа	167	160	200

Напряжение вдоль оси, МПа	83	80	100
------------------------------	----	----	-----

Наилучшим выбором становится углепластик + вспененный алюминий. Он обладает:

- Наивысшей прочностью по всем направлениям.
- Наибольшей устойчивостью к внутреннему давлению.

Этот расчет дает базовые значения для оценки прочности алюминиевого бака. В реальных условиях могут потребоваться дополнительные корректировки и проверки, учитывающие специфику конструкции и эксплуатационные условия.

## 5 ПРОВЕРКА ПРОЧНОСТИ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ МАТЕРИАЛОВ

Проверка производилась в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. Для этого была построена упрощенная геометрия бака, без стрингеров и шпангоутов.

### 5.1 Проверка на прочность

Методология анализа прочности в COMSOL:

1. Используется интерфейс Solid Mechanics (Механика твердых тел). Он позволяет моделировать статические и динамические нагрузки, а также учитывать различные типы материалов, включая линейно-упругие, нелинейно-упругие и пластичные материалы.

2. Создание или импорт геометрии конструкции.

3. В COMSOL можно использовать встроенные библиотеки материалов или задать пользовательские свойства. Для анализа прочности необходимо задать следующие параметры: модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел текучести, предел прочности.

4. Граничные условия определяют, как конструкция взаимодействует с окружающей средой. В зависимости от задачи, могут быть заданы следующие типы граничных условий:

- Фиксированные границы (Fixed boundary);
- Силы и давления (Force and pressure);
- Температурные нагрузки (Thermal loads).

5. Нагрузки могут быть статическими или динамическими. В COMSOL можно моделировать различные типы нагрузок, включая:

- Механические нагрузки (силы, моменты, давления);
- Температурные нагрузки (тепловые расширения и сжатия);
- Вибрационные нагрузки (динамические воздействия).

6. Выбор решателя зависит от типа задачи. Для статического анализа прочности обычно используется Stationary Solver, а для динамического анализа – Transient Solver.

### 5.1.1 Анализ результатов для алюминий-магниевого сплава серии 5083

Материал бака – алюминиево-магниевый сплав 5083, который обладает следующими свойствами:

- Модуль Юнга:  $E = 70$  ГПа;
- Коэффициент Пуассона:  $\nu = 0.33$  ;
- Предел текучести:  $\sigma_y = 250$  МПа;
- Предел прочности:  $\sigma_u = 310$  МПа.

Топливный бак подвергается внутренним давлениям, вызванным жидким кислородом. Внутреннее давление составляет:

$$P = 10 \text{ МПа.}$$

Граничные условия включают фиксированные опоры на днище бака.

На рисунке 13 представлены результаты на напряжение в топливном баке. Цветовая шкала показывает распределение эквивалентных напряжений (по Мизесу) в диапазоне от 0 до  $2 \times 10^6 \text{ Н / м}^2$ .

Наибольшие напряжения наблюдаются в области соединения днища и цилиндрической части бака. Это связано с концентрацией напряжений в местах изменения геометрии.

В цилиндрической части бака напряжения распределены более равномерно, что свидетельствует о хорошем распределении нагрузки.

Максимальные эквивалентные напряжения достигают  $1.3 \times 10^6 \text{ Н / м}^2$ , что значительно ниже предела текучести сплава 5083 (250 МПа). Это указывает на то, что материал бака работает в упругой области и не подвергается пластической деформации.

Фактор запаса прочности можно рассчитать, как отношение предела текучести к максимальным эквивалентным напряжениям:

$$FOS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\max}} = \frac{250 \cdot 10^6}{1.3 \cdot 10^6} = 192.31. \quad (11)$$

Высокий фактор запаса прочности свидетельствует о высокой надежности конструкции.

Анализ результатов на напряжение для топливного бака с жидким кислородом, изготовленного из алюминий-магниевого сплава 5083, показывает, что конструкция работает в упругой области и обладает высоким фактором запаса прочности. Это подтверждает надежность и безопасность использования данного материала для изготовления топливных баков в аэрокосмической промышленности.

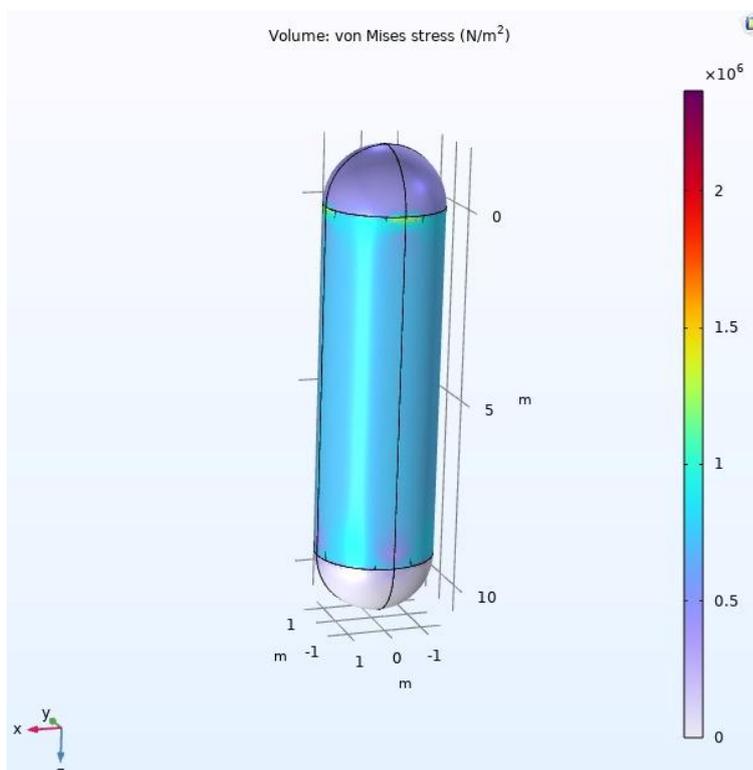


Рисунок 13 – Результат на напряжение в топливном баке из алюминий-магниевого сплава

### 5.1.2 Анализ результатов для нержавеющей стали серии 300

Материал бака – нержавеющая сталь серии 300, которая обладает следующими свойствами:

- Модуль Юнга:  $E = 200$  ГПа;
- Коэффициент Пуассона:  $\nu = 0.3$  ;
- Предел текучести:  $\sigma_y = 200$  МПа;

– Предел прочности:  $\sigma_u = 500$  МПа.

Наибольшие напряжения наблюдаются в области соединения днища и цилиндрической части бака. Это связано с концентрацией напряжений в местах изменения геометрии.

В цилиндрической части бака напряжения распределены более равномерно, что свидетельствует о хорошем распределении нагрузки.

Максимальные эквивалентные напряжения достигают  $1.2 \times 10^6 \text{ Н / м}^2$ .  
Материал бака работает в упругой области и не подвергается пластической деформации.

Фактор запаса прочности:

$$FOS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\max}} = \frac{200 \cdot 10^6}{1.2 \cdot 10^6} = 166.6. \quad (12)$$

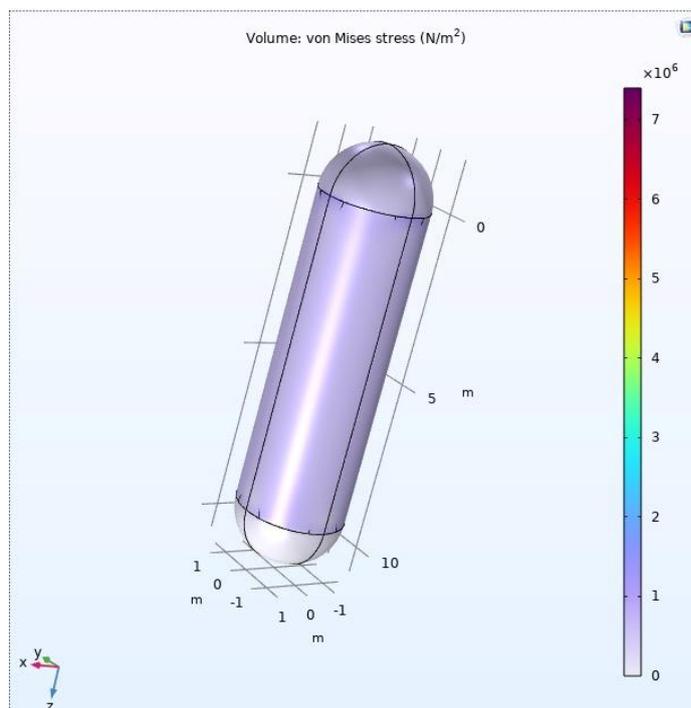


Рисунок 14 – Результат на напряжение в баке из нержавеющей стали

### 5.1.3 Анализ результатов для углепластика + вспененного алюминия

Материал внешней оболочки бака — углепластик, а внутренняя часть — вспененный алюминий. Свойства материалов:

- 1) Углепластик:
  - Модуль Юнга:  $E = 150$  ГПа;
  - Коэффициент Пуассона:  $\nu = 0.3$  ;
  - Предел текучести:  $\sigma_y = 1000$  МПа;
  - Предел прочности:  $\sigma_u = 1500$  МПа.
- 2) Вспененный алюминий:
  - Модуль Юнга:  $E = 10$  ГПа;
  - Коэффициент Пуассона:  $\nu = 0.3$  ;
  - Предел текучести:  $\sigma_y = 50$  МПа;
  - Предел прочности:  $\sigma_u = 100$  МПа.

Наибольшие напряжения наблюдаются в области соединения днища и цилиндрической части бака. Это связано с концентрацией напряжений в местах изменения геометрии.

В цилиндрической части бака напряжения распределены более равномерно, что свидетельствует о хорошем распределении нагрузки.

Максимальные эквивалентные напряжения достигают  $3.2 \times 10^8 \text{ Н / м}^2$ .

Фактор запаса прочности:

$$FOS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\max}} = \frac{1000 \cdot 10^6}{3.2 \cdot 10^8} + \frac{50 \cdot 10^6}{3.2 \cdot 10^8} = 3.28. \quad (13)$$

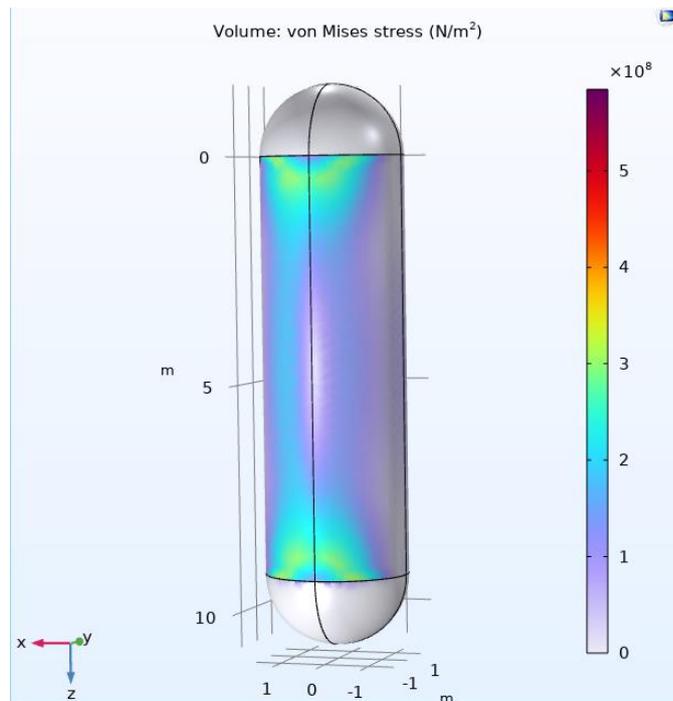


Рисунок 15 – Результат на напряжение в баке из углепластика + вспененный алюминий

## 5.2 Проверка теплопередачи

Анализ теплообмена в COMSOL Multiphysics представляет собой мощный инструмент для моделирования и исследования тепловых процессов в различных системах и материалах. Целью такого анализа является понимание, предсказание и оптимизация теплового поведения объектов, что критично для разработки и функционирования инженерных систем. Этот анализ позволяет оценить распределение температуры, тепловые потоки и температурные градиенты, возникающие в результате теплопроводности, конвекции и излучения.

Для анализа теплообмена в COMSOL используется интерфейс Heat Transfer in Solids (Теплопередача в твердых телах). Этот интерфейс позволяет моделировать различные аспекты теплообмена, включая:

- Теплопроводность (Conduction);
- Конвекцию (Convection);
- Тепловое излучение (Radiation);
- Фазовые переходы (Phase Change).

Таблица 19 – Сравнение характеристик по результатам анализа на теплообмен

Критерий	Алюминиево-магнийевый сплав 5083 (рис.16)	Нержавеющая сталь 300-й серии (рис.17)	Углепластик + вспененный алюминий (рис.18)
Внешняя поверхность (температура)	Бледно-желтая (~300-320 К)	Бледно-желтая (~300-320 К)	Желто-оранжевая (~250-300 К)
Внутренняя поверхность (температура)	Фиолетовая (~70-100 К)	Фиолетовая (~70-100 К)	Фиолетовая (~70-100 К)
Температурный градиент (стенка)	Заметный, но плавный	Заметный, но плавный	Наименее выраженный
Теплоизоляционный слой	Четко виден	Четко виден	Четко виден
Температура теплоизоляционного слоя	Умеренно-высокая (от внешней к внутренней)	Умеренно-высокая (от внешней к внутренней)	Меньше выражено изменение от внешней к внутренней
Общая визуальная оценка теплоизоляции	Средняя	Средняя	Высокая

Все три бака демонстрируют схожую температуру внешней поверхности (~300-320 К). Это указывает на то, что все они находятся в контакте с примерно одинаковой окружающей средой. Все имеют температуру внутренней поверхности близкую к температуре жидкого кислорода (~70-100 К).

Наиболее заметное различие наблюдается в температурном градиенте через стенку бака. Композитный бак (углепластик + вспененный алюминий) имеет наименее выраженный температурный градиент. Это означает, что разница температур между внутренней и внешней поверхностями более равномерно распределена по толщине стенки, что является признаком более эффективной теплоизоляции. Алюминиевый и стальной баки показывают более резкий градиент, что свидетельствует о большем тепловом потоке через стенку.

Поскольку все три бака визуально содержат теплоизоляционный слой (красного цвета), важно оценить температуру этого слоя. В алюминиевом и стальном баках видно более резкое изменение температуры в этом слое, от высокой (на внешней стороне) до сравнительно низкой (на внутренней стороне). В композитном баке изменение температуры в теплоизоляционном слое менее выражено. Это указывает на то, что этот слой в композитном баке более эффективно блокирует тепловой поток, поддерживая более равномерную температуру.

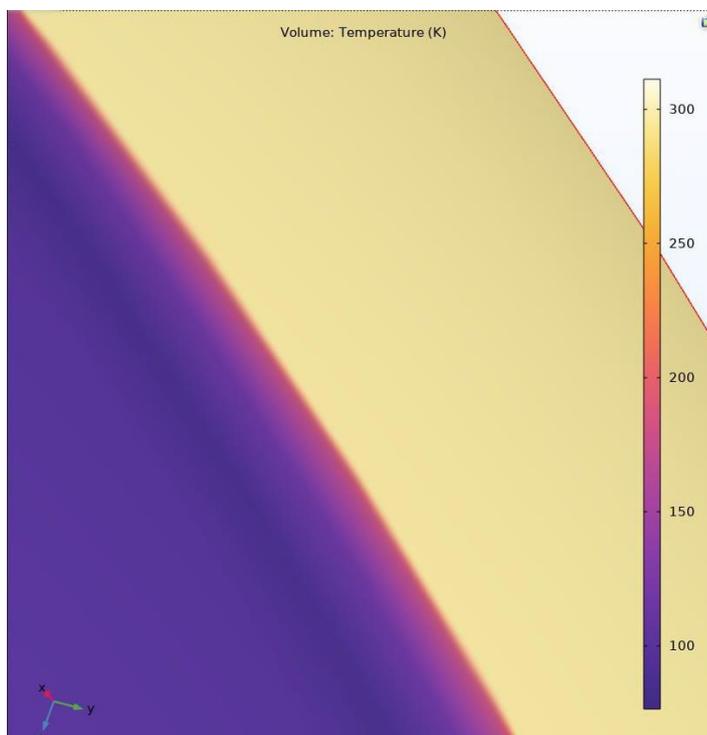


Рисунок 16 – Результат на теплообмен в баке из алюминий-магниевого сплава

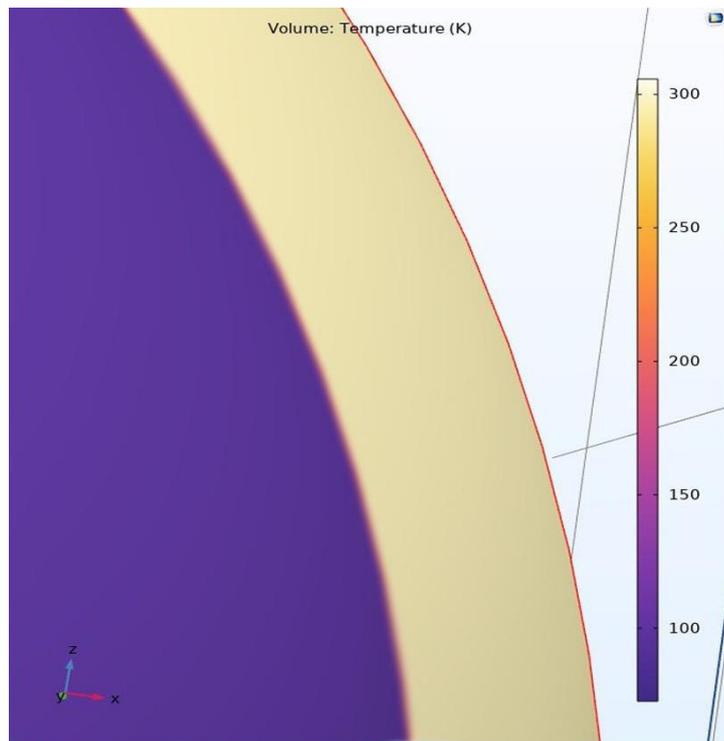


Рисунок 17 – Результат на теплообмен в баке из нержавеющей стали

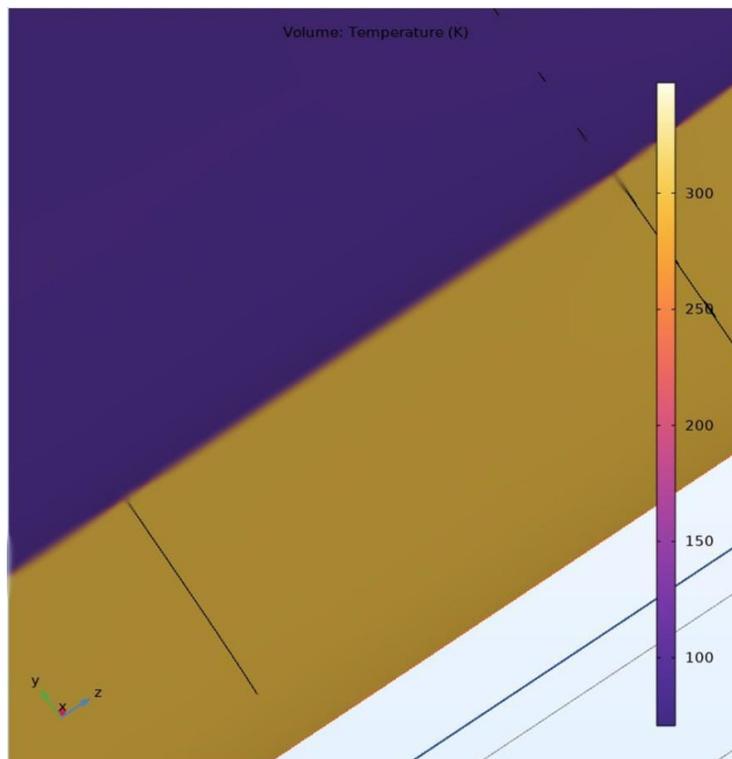


Рисунок 18 – Результат на теплообмен в баке из углепластика +  
вспененный алюминий

С точки зрения теплообмена, наиболее эффективным решением, судя по визуальному анализу результатов моделирования, является использование композитной конструкции с углепластиком и вспененным алюминием. Эта конструкция демонстрирует наиболее равномерное распределение температуры в стенке бака и, следовательно, наименьший теплоприток к жидкому кислороду. Алюминиевый и стальной баки выглядят менее эффективными в плане теплоизоляции по сравнению с композитным решением, на основании анализа температурных градиентов.

## 6 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ

В данной главе из таких материалов, как алюминий-магниевый сплав, нержавеющая сталь, композиционный материал (углепластик), рассматривается третий материал, так как он является самым перспективным для производства криогенного топливного бака.

При работе с углепластиком существует вероятность возникновения пожароопасной ситуации.

### **6.1 Пожароопасность углепластиков при создании криогенного топливного бака**

Производство криогенных топливных баков из углепластика, как и любое производство композиционных материалов, связано с повышенной пожароопасностью. Согласно ГОСТ 12.1.044-2018 углепластики относятся к группе горючести Г4 (сильногорючие материалы). В случае пожара быстрое распространение огня, ограничение ограниченных продуктов горения и возможность взрыва паров растворителей представляют собой серьезную опасность для жизни и здоровья персонала, а также для безопасности оборудования.

Специфические факторы, повышающие пожароопасность при создании криогенных топливных баков:

- Большие площади: крупные размеры криогенных баков соответствуют площади строгого возгорания и соблюдают меры по быстрому распространению огня.

- Интенсивное использование ЛВЖ: Процессы использования пропитки, очистки и ухода требуют больших объемов легковоспламеняющихся жидкостей, что повышает риск возникновения пожара и взрыва.

- Сложность тушения: Многослойная структура и математическая геометрия баков затрудняют тушение пожара и соблюдение времени его локализации.

– Криогенные температуры: Криогенные температуры могут способствовать конденсации кислорода из воздуха на поверхностях материалов, увеличивая их горючесть. Также при аварийной разгерметизации бака выброс криогенного топлива может привести к образованию взрывоопасных смесей.

### **6.1.1 Горючесть компонентов углепластика**

#### **1. Углеродные волокна.**

– Опасность: Не горят в воздушной среде, но при нагревании до 600°C окисляются с образованием CO и CO<sub>2</sub> (ГОСТ 12.1.044-2018 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения»). В условиях высокой температуры (пожар) допускается горение за счет теплового излучения.

– Меры защиты: В случае пожара необходимо уточнить доступ к источнику горения углеродных волокон (Федеральный закон от 69-ФЗ «О пожарной безопасности»). Нанесение огнестойких покрытий на углепластиковые конструкции может замедлить процесс окисления углеродных волокон при высоких температурах (Методические рекомендации по применению огнезащитных покрытий). Установка водяного системного охлаждения в зонах хранения и обработки углеродных волокон может способствовать снижению температуры в случае пожара (СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование»).

#### **2. Полимерные связующие.**

– Опасность: Эпоксидные смолы – температура воспламенения 300–400°C (ГОСТ 12.1.044-2018). Фенольные смолы – при нагревании получения формальдегида и других окисленных газов (ГОСТ 12.1.044-2018). Полиэфирные смолы – горят с образованием электронного дыма (ГОСТ 12.1.044-2018).

– Меры защиты: Применение огнестойких полимерных связующих, снижение скорости распространения огня и уменьшение ограничения опасных продуктов горения (Рекомендации по выбору огнестойких связующих). Хранить на рабочем месте только необходимое количество смолы (Правила противопожарного режима в Российской Федерации, утверждают

Постановлением регулирования РФ от 16.09.2020 N 1479). Хранение смолы в герметичной таре в прохладном, хорошо вентилируемом месте, вдали от источников тепла и открытого огня (Правила противопожарного режима в Российской Федерации). Регулярное удаление отходов смолы и пропитанных материалов в специально отведенные контейнеры (Федеральный закон от 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления»).

### 3. Растворители

– Опасность: Легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ) при низкой температуре поражения: ацетон (-18°C) (ГОСТ 12.1.044-2018); толуол (4°C) (ГОСТ 12.1.044-2018).

– Меры защиты: Использование взрывобезопасного оборудования (насосы, смесители, вентиляторы) в зонах работы с растворителями (ТР ТС 012/2011 «О безопасности оборудования для работ во взрывоопасных средах»). Обязательно заземление оборудования для предотвращения накопления статического электричества (ПУЭ «Правила устройства электроустановок»). Обеспечение эффективной вентиляции рабочих помещений для удаления паров растворителей (СНиП 41-01-2003). Запрет на курение, использование открытого огня и электронных нагревательных приборов в зонах работы с растворителями (Правила противопожарного режима в Российской Федерации). Хранение растворителей в герметичных, взрывобезопасных емкостях, попадании от источников тепла и открытого огня (Правила противопожарного режима в Российской Федерации).

#### **6.1.2 Опасные факторы пожара**

1. Токсичные продукты горения: СО (угарный газ) – блокирует гемоглобин; HCN (циановодород) – смертельно опасен даже маленьких частиц в концентрации; формальдегид, фенолы – раздражают верхние пути.

2. Высокая температура (пламя может достигать 1000–1200°C).

3. Опасность взрыва при скоплении паров растворителей.

## 6.2 Расчет категории помещения по пожарной опасности

Методика расчета взята с СП 12.13130.2009 (Свод правил Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности)

Исходные данные:

1. Горючие материалы:

– Углепластик: 800 кг (теплота сгорания 32 МДж/кг)

– Эпоксидная смола: 600 кг (теплота сгорания 28 МДж/кг)

– Ацетон: 400 кг (теплота сгорания 31 МДж/кг,  $t_{всп} = -18^{\circ}\text{C}$  – ЛВЖ)

2. Параметры помещения:

– Размеры: 20 м × 15 м × 6 м (объем 1800 м<sup>3</sup>, площадь 300 м<sup>2</sup>)

Расчет пожарной нагрузки:

$$Q = \sum (m_i \cdot Q_{ni}) \quad (14)$$

1. Углепластик:

$$Q_1 = 800 \cdot 32 = 25600 \text{ МДж}$$

2. Эпоксидная смола:

$$Q_2 = 600 \cdot 28 = 16800 \text{ МДж}$$

3. Ацетон:

$$Q_3 = 400 \cdot 31 = 12400 \text{ МДж}$$

Суммарная пожарная нагрузка:

$$Q = 25600 + 16800 + 12400 = 54800 \text{ МДж}$$

Удельная пожарная нагрузка:

$$g = \frac{Q}{S} = \frac{54800}{300} = 182,7 \text{ МДж} / \text{м}^2 \quad (15)$$

Определение категории по СП 12.13130.2009

Таблица 20 – Категории помещений

Удельная нагрузка, МДж/м <sup>2</sup>	Категория помещения
$\leq 180$	В4 (умеренная)
$180 < g \leq 1400$	В3 (средняя)
$1400 < g \leq 2200$	В2 (высокая)
$> 2200$	В1 (очень высокая)

Предварительная категория:

Так как  $g = 182,7 \text{ МДж} / \text{м}^2$ , помещение относится к В3.

Учет легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ)

По п. 5.2 СП 12.13130, если в помещении есть ЛВЖ ( $t_{\text{всп}} \leq 28^\circ\text{C}$ ) в количестве  $>20$  кг, категория повышается до В2 или В1.

Данные по ацетону:

– Температура вспышки:  $-18^\circ\text{C}$  (ГОСТ 2768-84);

– Количество: 400 кг (значительно  $>20$  кг).

Помещение переводится в категорию В1 (очень высокая пожароопасность).

### 6.3 Меры противопожарной защиты

1. Технические решения:

– Оборудование цехов автоматическими линиями пожаротушения (газовые или аэрозольные установки) (СП 5.13130.2009 «Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования»). Прежде всего, к криогенным бакам важен выбор системы пожаротушения, совместимой с материалами бака и не приводящей к их повреждению (Техническая документация на криогенные топливные баки). Газовые системы, такие как Noves 1230 или FM-200, могут быть предпочтительнее водных систем, так как не вызывают коррозию и не повреждают электрооборудование (СП 5.13130.2009). Важно предусмотреть систему вентиляции для удаления

газообразных огнетушащих веществ после тушения пожара (СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование»).

– Хранение растворителей во взрывобезопасных шкафах (ГОСТ Р 56470-2018 «Шкафы для хранения легковоспламеняющихся жидкостей. Общие технические требования и методы испытаний»).

– Детекторы пожара и дыма: Установка детекторов пожара и дыма в местах хранения материалов и проведения работ (СП 5.13130.2009).

– Разделение на пожарные секции: Разделение производственных помещений на пожарные секции с использованием огнестойких перегородок и дверей (Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»).

– Системы оповещения о пожаре: Установка систем оповещения о пожаре с четкими людьми при эвакуации (СП 3.13130.2009 «Системы противопожарной защиты. Системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности»).

## 2. Организационные меры:

– Обучение персонала по правилам пожарной безопасности (ППР в РФ), утвержденным Постановлением экономики РФ от 16.09.2020 N 1479. Необходимо учитывать специфику пожароопасности углепластиков и криогенных систем. Обучение должно включать информацию о свойствах материалов, правилах работы с ЛВЖ, использовании средств пожаротушения и правилах эвакуации (ГОСТ 12.0.004-2015 «Система стандартной безопасности труда (ССБТ. Организация обучения безопасности труда. Общие положения»).

– Запрет на курение и открытый огонь в зоне работ с углепластиком (ППР в РФ).

– Разработка плана пожарной безопасности с учетом специфики производства криогенных баков (ППР в РФ). Проведение регулярных противопожарных тренировок для персонала (ППР в РФ). Назначение ответственных за пожарную безопасность лиц, прошедших специальную подготовку (ППР в РФ).

### 3. Средства пожаротушения:

– Порошковые огнетушители (ОП-5 по ГОСТ Р 51057-2001 «Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний») – для тушения электрооборудования.

– Песок и кошма – для локализации мелких очагов возгорания (ППР в РФ).

– Водяные огнетушители: С осторожностью, только после обесточивания оборудования (Инструкция по применению огнетушителей). Необходимо учитывать возможность повреждения электрооборудования и материалов бака (Техническая документация на криогенные топливные баки).

– Пенные огнетушители: Эффективны для тушения пожаров класса Б (горение жидкостей) (Инструкция по применению огнетушителей).

– Автоматические системы пожаротушения: Газовые или аэрозольные установки с учетом совместимости с материалами бака (СП 5.13130.2009).

– Противопожарный водопровод: Применение противопожарного водопровода с пожарными гидрантами на территории предприятия (СНиП 2.04.02-84\* «Водоснабжение. Наружные сети и обслуживание»).

Дополнительные меры безопасности, специальные для производства криогенных топливных баков:

– План разработки действий при аварийной разгерметизации бака: План должен предусматривать эвакуацию персонала, перекрытие подачи криогенного топлива, нейтрализацию паров топлива и ликвидацию аварийной ситуации.

– Установка датчиков утечки криогенного топлива: Датчики должны обнаруживать утечку топлива на ранней стадии и выдавать сигнал излучения.

– Использование специального оборудования для работы с криогенными жидкостями: Оборудование должно быть изготовлено из материалов, устойчивых к воздействию низких температур и иметь систему предотвращения утечек.

– Огнезащитная обработка конструкций: Применение огнезащитных составов для повышения огнестойкости несущих конструкций здания и оборудования.

Пожароопасность при производстве криогенных топливных баков из углепластика требует комплексного подхода, включения технических решений, организационных мер и использования эффективных средств пожаротушения. Необходимо тщательно планировать и реализовывать все этапы производства, обеспечивать постоянный контроль за соблюдением правил пожарной безопасности и регулярно проводить обучение персонала. Только таким образом можно минимизировать риск возникновения пожара и обеспечить безопасность людей и оборудования. Важно помнить, что выбор мер пожарной безопасности должен основываться на риске, и необходимо учитывать специфику анализа каждого производственного участка.

## 7 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данной главе будет проведена экономическая составляющая выпускной квалификационной работы, а именно стоимость материалов, таких как алюминий-магниевый сплав, нержавеющая сталь серии 300, углепластик + вспененный алюминий, для создания криогенного топливного бака УРМ1.

Общая стоимость:

$$C_{\text{общ}} = M_{\text{б}} \cdot P_{\text{матер}} + C_{\text{обработ}} + C_{\text{перевоз}}, \quad (16)$$

где  $M_{\text{б}}$  – масса бака;

$P_{\text{матер}}$  – цена материала за килограмм;

$C_{\text{обработ}}$  – стоимость на обработку и работы с материалом;

$C_{\text{перевоз}}$  – стоимость на перевозки материала.

Из расчета массовых характеристик, известно, что:

$M_{\text{ал}} = 4131 \text{ кг}$  – масса алюминиево-магниевого бака;

$M_{\text{ст}} = 9712 \text{ кг}$  – масса бака из нержавеющей стали;

$M_{\text{уз}} = 2448 \text{ кг}$  – масса бака из углепластика + вспененный алюминий.

Актуальные цены материалов:

1. Алюминий-магниевый сплав серии 5083 – средняя цена по рынку 630 у.е./кг.

2. Нержавеющая сталь серии 300 – средняя цена по рынку 890 у.е./кг.

3. Углепластик + вспененный алюминий – рулон углеткани (карбон) весом 160г и длиной 1м стоит 2599 у.е. Значит цена за кг будет равна:

$$P = \frac{1000}{160} \cdot 2599 = 16244 \text{ у.е. / кг.}$$

Цена вспененного алюминия варьируется в зависимости от заказа, в пределах от 500 до 2000 у.е. за кг.

Цена на эпоксидные смолы на основе бисфенола А и эпихлоргидрина варьируются в зависимости от объемов закупки и конкретных характеристик продуктов, отвердитель Е-40, средняя цена составляет 1000 у.е./кг.

Общая стоимость без учета затрат на обработку материала и перевозки будет составлять:

$$C_{ал} = M_{ал} \cdot P_{ал} = 4131 \cdot 630 = 2602530 \text{ у.е.} \quad (17)$$

$$C_{сталь} = M_{ст} \cdot P_{ст} = 9712 \cdot 890 = 8643680 \text{ у.е.} \quad (18)$$

$$C_{уз+ал} = (M_{уз} \cdot P_{уз}) + (M_{вспен} \cdot P_{вспен}) + (M_{эпок} \cdot P_{эпок}) = (800 \cdot 16244) + (1000 \cdot 800) + (648 \cdot 1000) = 779712 + 57600 + 5000 = 14443200 \text{ у.е.} \quad (19)$$

Помимо самой стоимости материала, необходимо учесть затраты на обработку поверхности, термообработку, очистку, покрытие защитными слоями и антикоррозионную защиту.

Таблица 21 – Приблизительные затраты на обработку и подготовку материала

Основные этапы	Алюминий-магниевый сплав	Нержавеющая сталь
Плавка и литье, у.е./кг	100 – 500	150 – 600
Нагрев и прокатка, у.е./кг	50 – 200	100 – 300
Выпрямление, у.е./кг	20 – 100	50 – 200
Финишная обработка, у.е./кг	30 – 150	80 – 300
Сварка, у.е./кг	100 – 500	200 – 800
Анодирование, у.е./кг	50 – 200	100 – 400
Механическая обработка, у.е./кг	100 – 500	200 – 800
Транспортировка, у.е./кг	50 – 200	100 – 300

Средняя стоимость обработки и подготовки алюминий-магниевого сплава и нержавеющей стали:

$$C_{cp-ал} = \frac{100 + 50 + 20 + 30 + 100 + 50 + 100 + 50}{8} = 62,5 \text{ у.е. / кг},$$

$$C_{cp-ст} = \frac{150 + 100 + 50 + 80 + 200 + 100 + 200 + 100}{8} = 122,5 \text{ у.е. / кг}.$$

Общая стоимость обработки и подготовки алюминий-магниевого сплава и нержавеющей стали:

$$C_{об-ал} = M_{ал} \cdot C_{cp-ал} = 4131 \cdot 62,5 = 258188 \text{ у.е.} \quad (20)$$

$$C_{об-ст} = M_{ст} \cdot C_{cp-ст} = 9712 \cdot 122,5 = 1189720 \text{ у.е.} \quad (21)$$

Затраты на обработку и подготовку углепластика и вспененного алюминия для изготовления топливного бака:

Таблица 22 – Приблизительные затраты на обработку и подготовку углепластика и вспененного алюминия

Основные этапы	Углепластик	Вспененный алюминий
Производство, у.е./кг	20-50	500-1500
Формование, у.е./кг	100-500	200-800
Сушка и отверждение, у.е./кг	50-200	–
Механическая обработка, у.е./кг	100-500	200-800
Покрытие и финишная обработка,	50-200	100-500
Транспортировка, у.е./кг	50-200	100-300

Средняя стоимость обработки и подготовки углепластика и вспененного алюминия:

$$C_{\text{ср-уг}} = \frac{20 + 100 + 50 + 100 + 50 + 50}{6} = 61,6 \text{ у.е. / кг},$$

$$C_{\text{ср-вспен}} = \frac{500 + 200 + 100 + 20 + 100}{5} = 184 \text{ у.е. / кг}.$$

Общая стоимость обработки и подготовки углепластика и вспененного алюминия:

$$C_{\text{об-уг}} = M_{\text{уг}} \cdot C_{\text{ср-уг}} = 800 \cdot 61,6 \cdot 81,5 = 4016320 \text{ у.е.} \quad (22)$$

$$C_{\text{об-вспен}} = M_{\text{вспен}} \cdot C_{\text{ср-вспен}} = 1000 \cdot 184 = 184000 \text{ у.е.} \quad (23)$$

Полная стоимость материалов:

$$C_{\text{полн-ал}} = C_{\text{ал}} + C_{\text{об-ал}} = 1602530 + 258188 = 1860718 \text{ у.е.} \quad (24)$$

$$C_{\text{полн-ст}} = C_{\text{ст}} + C_{\text{об-ст}} = 8643680 + 1189720 = 9833400 \text{ у.е.} \quad (25)$$

$$C_{\text{полн-уг+вспен}} = C_{\text{уг+вспен}} + (C_{\text{об-уг}} + C_{\text{об-вспен}}) = 14443200 + (4016320 + 184000) = 18643520 \text{ у.е.} \quad (26)$$

Таблица 23 – Общая стоимость

Материал	Стоимость, у.е.
Алюминий-магниевый сплав серии 5083	1860718
Аустенитная нержавеющая сталь серии 300	9833400
Углепластик + вспененный алюминий	18643520

Если рассматривать материалы только по стоимости, то самым дешевым вариантом является алюминиево-магниевый сплав серии 5083, который стоит 1

860 718 у.е. Это значительно дешевле по сравнению с нержавеющей сталью серии 300 и углепластик + вспененным алюминием.

Таким образом, если основной критерий выбора – это стоимость, то алюминиево-магниевый сплав серии 5083 является наиболее выгодным вариантом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной бакалаврской работы были рассмотрены три основных материала для изготовления криогенного топливного бака универсального ракетного модуля первой ступени ракет-носителей семейства «Ангара»: алюминий-магниево-сплав, нержавеющая сталь серии 300 и композитный материал (углепластик + вспененный алюминий). Проведен всесторонний анализ перспективных материалов, применяемых в производстве криогенных топливных баков, алюминий-магниево-сплавов, нержавеющих сталей серии 300 и композиционных материалов на основе углепластика. Выявлены и систематизированы преимущества и недостатки каждого материала с акцентом на механические свойства при криогенных температурах, коррозионную стойкость, технологичность обработки и экологические аспекты.

Разработаны математические модели с использованием программного обеспечения MATLAB. Проведены расчеты массовых характеристик для трех рассматриваемых материалов при заданных геометрических параметрах топливного бака. Результаты расчетов показывают, что углепластик + вспененный алюминий имеет наименьшую массу (2448 кг), что в 1,7 раза меньше, чем у алюминий-магниево-сплава (4131 кг) и в 4 раза меньше, чем у нержавеющей стали серии 300 (9712 кг). Выполнен прочностной расчет для определения максимально допустимого внутреннего давления и напряжений в стенках бака. Полученные результаты подтвердили, что углепластик + вспененный алюминий обладают меньшей прочностью и максимальной устойчивостью к внутреннему давлению (2483 кПа).

Проведена проверка прочности и теплопередачи материалов с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Результаты исследования подтвердили, что углепластик + вспененный алюминий являются лучшими показателями теплоизоляции и распределения напряжений. Анализ напряженности показал, что углепластик + вспененный алюминий обеспечивает

наибольший запас прочности по сравнению с алюминиево-магниевым сплавом и нержавеющей сталью.

Произведена экономическая стоимость материалов и затраты на их обработку. Самым дорогим вариантом оказался углепластик + вспененный алюминий (в 10 раз дороже алюминий-магниевого сплава, практически в 2 раза дороже нержавеющей стали).

На основании проведенного исследования можно заключить, что, с точки зрения технической характеристики, композитный материал (углепластик + вспененный алюминий) является наиболее перспективным для изготовления криогенного топлива бака УРМ первой ступени ракеты-носителя корпуса «Ангара». Это обеспечивает наилучшее сочетание прочности, минимального веса и теплоизоляционных свойств. Однако необходимо учитывать высокую стоимость и сложность производства этого материала.

В случае, если ограничения являются определяющими, алюминиево-магниевый сплав может рассматриваться как альтернативный вариант, хотя он и уступает композитному материалу по массогабаритным и теплофизическим характеристикам.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колодяжная, И. Н. Перспективные сочетания материалов криогенных топливных баков ракет-носителей / И. Н. Колодяжная, И. В. Сгибнева // Наука и бизнес: пути развития. – 2021. – № 6(120). – С. 31-34. – EDN PVUFMO.
2. Патент № 2763410 С1 Российская Федерация, МПК В64G 1/22, В32В 1/02, В64G 1/00. Топливный бак и способ его изготовления: № 2021106933: заявл. 17.03.2021: опубл. 29.12.2021 / М. А. Пономарев, С. Ю. Снытин, П. А. Пономарев, И. Д. Якимов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "С 7 Космические Транспортные Системы". – EDN LUDBJK.
3. Андреев А.К., Ермаков Б.С. Материалы для низкотемпературной техники: Учеб. пособие. — СПб.: Университет ИТМО, 2016. — 355 с.
4. Патент № 2738247 С1 Российская Федерация, МПК В64G 1/22, В64D 37/06. Топливный бак жидкостных двигательных установок ракет большой грузоподъемности: № 2020118616: заявл. 05.06.2020: опубл. 14.12.2020 / А. В. Владимиров, С. В. Кузнецов; заявитель Акционерное общество "Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева". – EDN VTLPYH.
5. Сердюк В.К. Проектирование средств выведения космических аппаратов: учеб. Пособие для вузов / В.К. Сердюк; под ред. А.А. Медведева. – М.: Машиностроение, 2009. – С. 504.
6. Филин, А.П. Элементы теории оболочек / А.П. Филин. – Л.: Стройиздат, 1975. – 256.
7. Лотоцкая, В.А. Прочность и пластичность металлических и неметаллических композитов криогенного и аэрокосмического назначения / В.А. Лотоцкая, Ю.А. Похил, А.И. Телегон, С.М. Дергун // Проблемы прочности. – 2005. – №5. – С. 93 – 103.
8. Томас В. Влияние композитных материалов, применяемых в аэрокосмической промышленности на организм человека. Сибирский

государственный университет имени академика М.Ф. Решетнева. [Электронный ресурс]: офиц. сайт. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/> – 20.04.2025.

9. ГОСТ Р 57407–2017 – Волокна углеродные. Общие технические требования и методы испытаний.

10. Васильев, В.В., Протасов, В.Д. Композиционные материалы: справочник. - М.: Машиностроение, 1990. - 512 с.

11. Кривошеин, Г.С. Конструкционные материалы ракетно-космической техники: учеб. пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 448 с.

12. СНиП 41-01-2003 – Отопление, вентиляция и кондиционирование.

13. ГОСТ 12.4.021-75 – ССБТ. Системы вентиляционные. Общие требования.

14. ГОСТ 12.4.011-89 – ССБТ. Средства защиты промышленных предприятий. Общие требования и классификация.

15. ГОСТ 12.4.103-83 – ССБТ. Одежда специальная защитная, средства индивидуальной защиты ног и рук. Классификация.

16. ГОСТ Р 12.4.251-2009 – ССБТ. Одежда специальная для защиты от производственных загрязнений и механических воздействий. Общие технические требования.

17. ГОСТ Р 12.4.246-2008 – ССБТ. Обувь специальная защитная. Общие технические требования.

18. ГОСТ 12.4.028-76 – ССБТ. Респираторы фильтрующие противогазовые. Общие технические условия.

19. ГОСТ Р 12.4.294-2015 – ССБТ. Средства индивидуальной защиты органов движения. Полумаски фильтрующие для защиты от частиц. Общие технические условия.

20. ГОСТ 12.4.013-85 – ССБТ. Очки защитные. Общие технические условия.

21. ГОСТ 12.4.010-75 – ССБТ. Средства индивидуальной защиты. Рукавицы специальные. Технические условия.