

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  
Специальность 24.05.01 – Проектирование, производство и эксплуатация ракет  
и ракетно-космических комплексов  
Специализация – Эксплуатация стартовых и технических комплексов и систем  
жизнеобеспечения

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

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

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

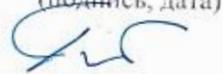
на тему: Проектирование сотовой панели для комплекта металло-защиты на  
стартовом столе космодрома Восточный

Исполнитель  
студент группы 9111-ос

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

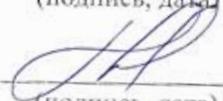
А.В. Романовский

Руководитель  
профессор, д-р техн. наук

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

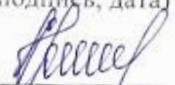
А.Д. Плутенко

Консультант  
доцент

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

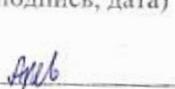
К.А. Насуленко

Консультант по БЖД  
доцент, канд. техн. наук

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

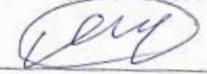
А.В. Козырь

Нормоконтроль  
Старший преподаватель СиТРК

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

М.А. Аревков

Рецензент

  
\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

А.С. Михайличенко

Благовещенск 2025



Руководитель выпускного квалификационного проекта: Плутенко А.Д.,  
профессор, д-р техн. наук.

Задание принял к исполнению (дата): 20.01.2025



## РЕФЕРАТ

Дипломная работа содержит 76 страниц, 43 рисунка, 7 таблиц, 1 приложение, 22 источника.

КОСМОДРОМ, ПУСКОВОЙ СТОЛ, КОМПЛЕКТ МЕТАЛЛО-ЗАЩИТЫ, НЕСКОЛЬЗЯЩЕЕ ПОКРЫТИЕ, СОТОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ, ОКАНТОВКА, НАПОЛНИТЕЛЬ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, ОБОРУДОВАНИЕ

Объектом данной работы является комплект металлозащиты для пускового стола на космодроме Восточный.

Предметом выпускной квалификационной работы является технологическая оснастка составных частей космодрома.

Цель работы – усовершенствовать покрытие стартового стола путём внедрения сотовых конструкций за счёт нескользящих свойств внешних панелей для обеспечения безопасности проведения работ на стартовом столе.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить имеющийся комплект металлозащиты перекрытия блока «Б» на космодроме Восточный, выявить и обосновать пути к усовершенствованию путём улучшения нескользящего покрытия.

2. Произвести выбор материала, конфигурации и методов изготовления сотовой конструкции и её основных элементов (окантовка, панель, наполнитель), выполнить расчёт проектных характеристик конструкции.

3. Проработать вопросы разработки производственного процесса изготовления нескользящих покрытий.

4. Проработать вопросы безопасности жизнедеятельности при работе с покрытием и вопросы экономической эффективности разработанного изделия.

Результаты работы могут быть использованы в производственных реалиях по соответствующему направлению.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ.....	7
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 КОМПЛЕКТ МЕТАЛЛОЗАЩИТЫ СТАРТОВОГО СТОЛА.....	10
1.1 Устройство комплекта металлозащиты перекрытия блока «Б» .....	10
1.2 Основные проблемы, возникающие при использовании существующего комплекта металлозащиты и их решение .....	14
1.3 Основные сведения о сотовых конструкциях .....	15
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ.....	18
2.1 Выбор прототипа сотовой конструкции .....	18
2.2 Выбор материала сотовой конструкции.....	20
2.3 Выбор конфигурации сотового заполнителя.....	21
2.4 Выбор конструкции окантовок элементов сотовой конструкции .....	23
2.5 Выбор методов изготовления сотовой конструкции .....	24
2.6 Расчёт основных проектных характеристик сотовой конструкции .....	27
3 РАЗРАБОТКА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ АНТИСКОЛЬЗЯЩЕГО ПОКРЫТИЯ.....	41
3.1 Процессы в наше время.....	41
3.2 Оценка производства, недостатки и рекомендации.....	41
3.3 Описание линии производства сотового заполнителя .....	42
3.4 Процесс воссоздания структуры сотовой конструкции .....	44
3.5 Используемое оборудование. Порядок производства .....	45
3.6 Разработка комплекта конструкторской документации .....	46
3.7 Расчёт КМЗ на прочность в Solidworks .....	48
4 ПРОРАБОТКА ВОПРОСОВ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	56
4.1 Обеспечение безопасных условий труда при работе на стартовом комплексе .....	56
4.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов .....	56

4.3 Разработка мероприятий по устранению опасных и вредных производственных факторов при обработке деталей ГТД .....	58
4.4 Шум и мероприятия по его снижению.....	60
4.5 Технологическая вибрация.....	60
4.6 Воздушная среда в планируемом цехе .....	61
4.7 Пожарная безопасность .....	64
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРАБОТАННОГО ПОКРЫТИЯ.....	68
5.1 Метод построения секторограмм .....	68
5.2 Метод взвешенной оценки показателей качества .....	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	72
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	74
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	77

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

- АЛ – автоматическая линия;
- АСП – автомат склеивания пакетов;
- ГПС – гибкая производственная система;
- ДС – диффузионно-сварная (конструкция);
- КА – космический аппарат;
- КД – конструкторская документация;
- КЗБ – кабель-заправочная башня;
- КИК – командно-измерительный комплекс;
- КЛ – клеевая (конструкция);
- КЛА – космический летательный аппарат;
- КМЗ – комплект металло-защиты;
- КО – космический объект;
- МИК – монтажно-испытательный корпус;
- ПИ – производственная инструкция;
- ПКМ – прессованные композиционные материалы;
- ПН – паяная (конструкция);
- ПО – программное обеспечение;
- ПСК – поисково-спасательный комплекс;
- РКК – ракетно-космический комплекс;
- РКН – ракета космического назначения;
- РКС – ракетно-космическая система;
- РН – ракета-носитель;
- СП – стартовая позиция;
- СС – сварная по методу фирмы «Стресскин» (конструкция);
- ТНС – транспортно-накопительная система;
- ТП – техническая позиция;
- ЧПУ – числовое программное управление;
- ЭВМ – электронно-вычислительная машина.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие отечественной космонавтики неразрывно связано с созданием и совершенствованием инфраструктуры космических стартовых комплексов. Одним из ключевых элементов является пусковой стол, обеспечивающий безопасный запуск РН.

В настоящее время на космодроме Восточный, перспективном космическом центре России, используется специально разработанный КМЗ для РН "Ангара".

КМЗ предназначен для защиты бетонной части стартового сооружения от газодинамического воздействия РКН при пуске. В процессе эксплуатации комплект устойчив к применяемым рабочим жидкостям, смазкам, маслам и обладает износостойкостью к абразивному воздействию песка.

КМЗ обеспечивает:

- защиту бетонного покрытия на отметке «0» сооружения 1 от газодинамического воздействия при пуске РКН;
- защиту верхнего перекрытия блока «Б» сооружения;
- защиту бетонного основания КЗБ;
- доступ обслуживающего персонала на отметку «0.000» стартового сооружения.

Однако существующие покрытия КМЗ имеют недостатки:

- жесткая неустойчивость к морозам в зимнее время, от чего возникает опасность для всех работников комплекса в холодное время;
- недостаточная противоподвижная способность: при запуске РН может возникнуть сдвиг КМЗ, что приводит к нежелательным напряжениям в конструкции и угрожает безопасности пуска.

Актуальность темы обусловлена следующими факторами:

- повышение безопасности пусков: Нескользящее покрытие снижает риск смещения и повышение безопасности персонала при работе на пусковом столе, а отсюда повышается и надежность запуска РН;

– увеличение срока службы КМЗ: Повышенная износостойкость покрытия позволит увеличить интервал между ремонтными работами и снизить стоимость эксплуатации пускового стола;

– совершенствование отечественной космической техники: Разработка нового покрытия является вкладом в развитие космической промышленности России и создаёт предпосылки для создания более эффективных и безопасных стартовых комплексов.

Суть и новизна работы заключается в разработке сотовой конструкции для КМЗ, сочетающего в себе высокую износостойкость, доступность и эффективные противоскользкие свойства в зимние сроки работ.

На практике значимость данной работы заключается в возможности применения разработанного покрытия для улучшения эксплуатационных характеристик КМЗ на пусковом столе космодрома Восточный.

## 1 КОМПЛЕКТ МЕТАЛЛОЗАЩИТЫ СТАРТОВОГО СТОЛА

### 1.1 Устройство комплекта металлозащиты перекрытия блока «Б»

Комплект предназначен для защиты бетонной части перекрытия блока «Б» стартового сооружения от газодинамического воздействия РКН при пуске.

Основными составными частями комплекта металлозащиты перекрытия блока «Б» выступают плиты, полосы и узлы крепления плит.

Плиты с проложенными между ними полосами смонтированы на закладных элементах. Комплект закладных элементов металлозащиты перекрытия блока «Б» состоит из балок, ребёр, уголков и платиков, приваренных к закладным элементам стартового сооружения [6-7].

Для компенсации неточностей положения закладных элементов стартового сооружения между балками и закладными элементами стартового сооружения предусмотрены рёбра, представляющие собой набор листов, приваренных своими нижними торцами к закладным элементам стартового сооружения после выставления в процессе монтажа балок в требуемое положение, прилегающих к вертикальным листам балок. Балки зафиксированы уголками, приваренными одной стороной встык к вертикальным листам балок. Другой стороной уголки приварены к закладным элементам стартового сооружения.

Плиты КМЗ уложены на полки балок комплекта закладных. Для компенсации температурных расширений плит в поперечном направлении между их боковыми поверхностями и вертикальными листами балок предусмотрены зазоры. К плитам приварены полосы.

На проём приёмной колонки кислорода и азота установлен кожух, представляющий собой сварную металлическую конструкцию, состоящую из стенок в форме прямоугольных трапеций, прямоугольных листов и уголков.

Полости между плитами и стартовым сооружением залиты бетоном. Фиксация балок с противоположной стороны произведена стенками с рёбрами.

Плиты КМЗ уложены на полки балок комплекта закладных. Для компенсации температурных расширений плит в поперечном направлении между их боковыми поверхностями и вертикальными листами направляющих предусмотрены зазоры.

В плитах предусмотрены три технологических проёма для воздухопроводов, а в других плитах дополнительно предусмотрены посадочные места под блоки с датчиками системы измерения параметров технологического оборудования. На фланцах имеется четыре резьбовых отверстия. В рабочем состоянии – при установленных блоках, проёмы перекрыты крышками. При снятии блоков для замены неисправных датчиков устанавливают крышки с прокладками и закрепляют их каждую четырьмя винтами с цилиндрической головкой и шестигранным углублением с шайбами. Каждая крышка представляет собой собственно крышку круглой формы с четырьмя отверстиями под винты крепления, с прямоугольной выемкой, которая перекрыта ручкой, закреплённой двумя винтами [7].

Полости между плитами и стартовым сооружением залиты бетоном.

КМЗ перекрытия газохода предназначен для обеспечения защиты от газодинамического воздействия при пуске РКН участка газохода, расположенного симметрично оси пускового стола в стартовом сооружении.

Основными СЧ КМЗ перекрытия газохода являются плиты, полосы и узлы крепления плит [8].

Плиты смонтированы на закладных элементах. Комплект закладных металлозащиты перекрытия газохода состоит из балок, рёбер, уголков и платиков, приваренных к закладным элементам стартового сооружения.

Балки, стенки и уголки комплекта закладных металлозащиты перекрытия газохода определяют профиль перекрытия газохода. Для компенсации неточностей положения закладных элементов стартового сооружения между балками и закладными элементами стартового сооружения предусмотрены рёбра, представляющие собой набор листов, приваренных своими нижними торцами к закладным элементам стартового сооружения после выставления в

процессе монтажа балок в требуемое положение, и прилегающих к вертикальным листам балок.

В осевом направлении балки зафиксированы уголками, приваренными одной стороной встык к вертикальным листам балок. Другой стороной уголки приварены к закладным элементам стартового сооружения. Фиксация балок с противоположной стороны произведена стенками с рёбрами.

Плиты металлозащиты уложены на полки балок комплекта закладных. Для компенсации температурных расширений плит в поперечном направлении между их боковыми поверхностями и вертикальными листами направляющих предусмотрены зазоры [9].

В плитах предусмотрены три технологических проёма для воздухопроводов, а в других плитах дополнительно предусмотрены посадочные места под блоки с датчиками системы измерения параметров технологического оборудования. Посадочные места представляют собой гильзы с фланцами. На фланцах имеется четыре резьбовых отверстия. В рабочем состоянии – при установленных блоках, проёмы перекрыты крышками. При снятии блоков для замены неисправных датчиков устанавливают крышки с прокладками и закрепляют их каждую четырьмя винтами с цилиндрической головкой и шестигранным углублением с шайбами. Каждая крышка представляет собой собственно крышку круглой формы с четырьмя отверстиями под винты крепления, с прямоугольной выемкой, которая перекрыта ручкой, закреплённой двумя винтами.

Полости между плитами и стартовым сооружением залиты бетоном [10].

КМЗ основания КЗБ предназначен для обеспечения защиты основания и коммуникаций КЗБ от газодинамического воздействия при пуске РКН. Основными составными частями КМЗ выступают листы, полосы, уголки и плиты. Горизонтальный монтаж плит комплекта произведён поперечными рядами на закладных элементах металлозащиты перекрытия блока «Б» аналогично монтажу плит КМЗ перекрытия блока «Б» с обеспечением зазоров между стыками плит и полос 4 мм. Остальные полости между основанием КЗБ и

плитами комплекта, а также проёмы основания КЗБ закрыты приваренными листами и уголками [10].

В плитах с обеих сторон имеются два посадочных места под блоки с датчиками системы измерения параметров технологического оборудования. Посадочные места представляют собой гильзы с фланцами. Проёмы перекрыты крышками с прокладками, закреплёнными винтами с цилиндрической головкой и шестигранным углублением с шайбами.

Полости между плитами и основанием КЗБ залиты бетоном.

В комплекте применено пять блоков с установленными в них датчиками системы измерения параметров технологического оборудования. Места установки определены в соответствии с документацией в гильзах, забетонированных в основании стартового сооружения, подготовленному по строительному заданию.

Каждый блок включает в себя корпус, плату, на которой установлены три датчика – датчик DMP-331-111-4001, датчик ТП-А-1 005Л-(2x0,5) и датчик ТП К 0010(2).0-(4x0,5).

На внешней поверхности платы имеется надпись, соответствующая номеру точки измерения датчиками СИП ТО в соответствии с документацией СИП ТО.

Датчик DMP-331-111-400 установлен в угольнике, закреплённом винтами на кронштейне, который, в свою очередь, крепится болтами с шайбами на плате. Датчик соединён трубкой со штуцером, выведенным на поверхность платы, обдуваемой газовым потоком. Штуцер трубки и штуцер опломбированы. Датчики ТП-А-1 005Л-(2x0,5) и ТП К 0010(2).0-(4x0,5) установлены непосредственно в резьбовых гнездах платы [10].

Корпус сварной конструкции и представляет собой цилиндрическую обечайку, с одной стороны которой на наружной поверхности имеется фланец, а с другой приварена крышка, в которой предусмотрена бобышка со сквозным отверстием для обеспечения подвода кабелей системы измерений параметров технологического оборудования к датчикам, монтируемым в блоке.

На фланце платы имеются четыре сквозных отверстия с цилиндрическими цековками под винты крепления блока к плите металлозащиты, три глухих резьбовых отверстия под винты крепления платы к корпусу и два резьбовых отверстия с цилиндрическими цековками под болты, обеспечивающие демонтаж блока с плиты металлозащиты после пуска РКН.

Плата крепится к фланцу корпуса четырьмя винтами. Правильность сборки обеспечивается несимметричным расположением отверстий под винты крепления на панели и на корпусе. Стык платы с корпусом уплотнён прокладкой. На плате двумя винтами и девятью винтами закреплены кронштейны, предназначенные для крепления кабелей системы 373ИК61. Монтаж составных частей КМЗ совместно с датчиками выполняется по эксплуатационной документации на системы измерений параметров технологического оборудования [10].

Каждый блок в нерабочем положении закрыт крышкой, зафиксированной болтами.

Крышка включает в себя собственно крышку, прокладку и две ручки. Крышка представляет собой цилиндрическую обечайку, которая с одной стороны закрыта листом, а с другой стороны к ней приварен фланец. На фланце предусмотрены два сквозных отверстия, предназначенные для крепления крышки. На нижнюю плоскость фланца наклеена прокладка, обеспечивающая герметичность стыка крышки с блоком. Для удобства съёма-установки крышки к верхней плоскости фланца приварены две ручки.

## **1.2 Основные проблемы, возникающие при использовании существующего комплекта металлозащиты и их решение**

В настоящее время использование существующего КМЗ связано с рядом проблем. Прежде всего, конструкция, выполненная из металла, в климатических условиях Дальнего Востока не обеспечивает должной температурной защиты, в связи с чем работать в морозное время весьма затруднительно. Ещё одним недостатком эксплуатирующейся системы выступает значительное число сварочных операций, которые могут потребоваться при сборке КМЗ или

выполнении ремонтно-эксплуатационных мероприятий. В данной выпускной квалификационной работе рассматривается возможность модернизации КМЗ путём его замены на более перспективный, представляющий собой набор панелей сотовой конструкции. Разрабатываемый комплект адаптирован к климатическим условиям Дальнего Востока, может эксплуатироваться при значительных перепадах температур резко-континентального климата, при обеспечении нескользких свойств с целью повышения безопасности работы персонала.

### **1.3 Основные сведения о сотовых конструкциях**

К настоящему времени сотовые конструкции являются неотъемлемой частью изделий в различных отраслях промышленности. Их многолетние разработки, изготовление и исследования определили области их преимущественного использования. При этом в каждой отрасли промышленности сложились свои подходы к их конструктивному исполнению и технологическим приёмам изготовления, а также определился круг типовых сотовых конструкций, которые находят преимущественное использование в той или иной отрасли промышленности [10].

Порядок проектирования агрегатов сотовой конструкции условно может быть разделён на три этапа.

#### **1) Первый этап. Выработка исходных данных.**

Определяется место расположения сотовой конструкции в составе изделия, её функциональное назначение, гарантированный срок службы. Определяется конфигурация сотовой конструкции, её геометрические размеры, места стыковки со смежными элементами изделия, места присоединения деталей различного назначения. Определяются условия эксплуатации сотовой конструкции, условия обслуживания, перевозки и хранения. Определяются условия ремонта при получении повреждения различной степени. Определяются нагрузки, действующие на сотовую конструкцию при различных условиях её работы: статические, ударные, вибрационные, акустические, тепловые, радиационные и др. Составляются расчётные схемы сотовой конструкции для

каждого случая её нагружения. Определяется круг используемых конструкционных материалов и их механические характеристики в диапазоне заданных нагрузок [11-12].

2) Второй этап. Расчёт и выпуск конструкторско-технической документации.

В соответствии с исходными данными выбирается тип сотовой конструкции: КЛ, ПН, ДС, СС. При конструктивной схеме сотовой конструкции, включающей: собственно трёхслойную сотовую конструкцию; схемы типовых законцовок; усиливающих или переходных элементов в местах стыковки, присоединения силовых элементов или элементов для соединения конструкции со смежными элементами изделия; места приложения нагрузок (их величина и направление действия); производят расчёт оптимальных параметров сотовой конструкции (строительная высота, размеры и толщины всех входящих деталей и т.д.). По результатам расчёта в первом приближении определяется масса конструкции. Определяют возможность изготовления конструкции данных размеров и её элементов. Выпускаются рабочие чертежи сотовой конструкции, по которым определяется окончательно её масса. Выпускается расчётная и технологическая документация на сотовую конструкцию [10].

3) Третий этап. Экспериментальное подтверждение правильности выбора сотовой конструкции.

Испытания образцов всей номенклатуры конструкционных материалов, применяемых в сотовой конструкции, с целью определения их механических характеристик во всём диапазоне действующих нагрузок. Сравнение полученных экспериментальных данных с рекомендованными. Испытания проводятся в соответствии с действующими государственными стандартами. Разрабатываются методы испытаний, не регламентированные государственными стандартами. Определение размеров и формы испытываемых образцов, разработка устройств для их испытаний. Испытываются фрагменты конструкции [10].

Таким образом, в рамках первой главы выпускной квалификационной работы, посвящённой теоретическим основам функционирования КМЗ стартового стола, рассмотрены основные элементы РКК и изучено устройство КМЗ перекрытия блока «Б» на космодроме Восточный. Было выявлено, что в настоящее время использование существующего КМЗ связано с рядом проблем. Прежде всего, конструкция, выполненная из металла, в климатических условиях Дальнего Востока не обеспечивает должной температурной защиты, в связи с чем работать в морозное время весьма затруднительно. Ещё одним недостатком эксплуатирующейся системы выступает значительное число сварочных операций, которые могут потребоваться при сборке комплекта металлозащиты или выполнении ремонтно-эксплуатационных мероприятий. В связи с вышеперечисленным, в рамках данной выпускной квалификационной работы рассматривается возможность модернизации КМЗ путём его замены на более перспективный, представляющий собой набор панелей сотовой конструкции. Разрабатываемый комплект адаптирован к климатическим условиям Дальнего Востока, может эксплуатироваться при значительных перепадах температур резко-континентального климата, при обеспечении нескользящих свойств с целью повышения безопасности работы персонала.

## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Выбор прототипа сотовой конструкции

В связи с тем, что проектируемый КМЗ предназначен для работы в резко континентальном климате Дальнего Востока, с проектно-конструкторской точки зрения интерес представляет конструкция металлической теплозащиты для кораблей Х-33 и «Венчурстар», разрабатываемая в США [8, 10].

Общий вид КА Х-33 показан на рисунке 1. Наветренная поверхность Х-33, подвергаясь действию высокой температуры, выполнена из огнеупорной композиционной «горячей» конструкции и металлической теплозащиты, которая подобна той, что должна быть применена в аппарате «Венчурстар». Она изготовлена из сотовых поверхностных панелей типа «сэндвич» из суперсплава Инконель 615 или РМ-1000 и волокнистой изоляции, упакованной в фольгу.

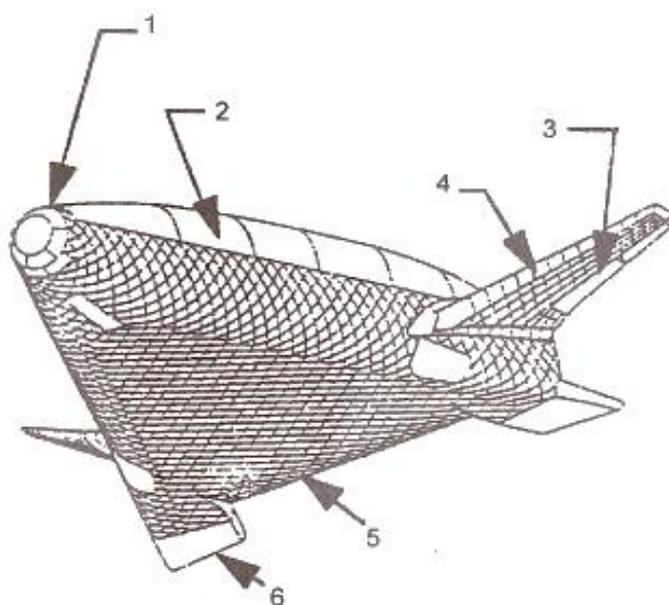


Рисунок 1 – Общий вид КА Х-33 с системой теплозащиты: 1 – носовой обтекатель, 2 – подветренная поверхность, 3 – элевон, 4 – передняя кромка крыла, 5 – наветренная сторона, киль, 6 – балансировочный щиток (керамическая плитка).

Подветренная поверхность покрывается изоляционными покрывалами, похожими на те, что использовались на кораблях «Спейс Шаттл». Покрывала состоят из волоконной изоляции, заключенной в чехлы из кварцевой ткани и наклеиваемой прямо на углепластиковую обшивку планера. Разработанная для многоразового носителя X-33 теплозащита состоит из ромбовидных металлических панелей с длиной кромки около 46 см. Панели состоят из сотовых типа «сэндвич» металлических панелей теплозащитного экрана с волоконной изоляцией, помещённой в фольгу и прикреплённой к внутренней стороне панелей теплозащитного экрана. Каждая ромбовидная панель механически крепится по углам к металлическим стойкам с розетками, которые, в свою очередь, крепятся к опорным балкам из композиционного материала. На рисунке 2 показана схема металлической теплозащиты, устанавливаемой на кораблях X-33 и «Венчурстар» [13-14].

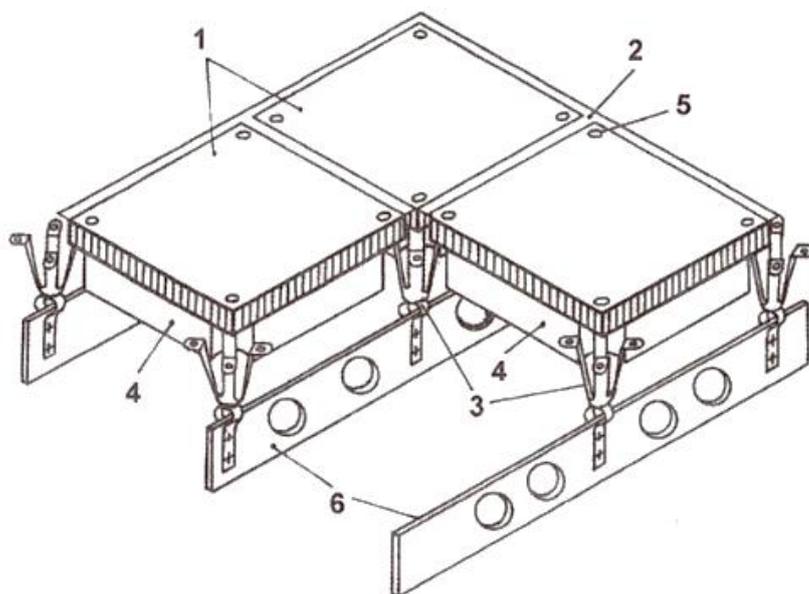


Рисунок 2 – Схема КМЗ кораблей X-33 и «Венчурстар»: 1 – металлическая сотовая панель, 2 – уплотнение между панелями, 3 – стойки и крепление панелей, 4 – изоляция, завернутая в фольгу, 5 – пробки на крепежных элементах, 6 – внешний силовой элемент криогенного бака

## 2.2 Выбор материала сотовой конструкции

Изготовление сотовых заполнителей можно осуществить из любых материалов, которые выпускаются в виде листов, полос, лент, рулонов тканей и нетканых материалов. В России авиационная и ракетно-космическая промышленности изготавливают сотовые заполнители из алюминиевых сплавов марок АМг-2Н, АД1Н, А1Т, САП толщиной 0,03; 0,04; 0,05; 0,08; 0,1 и 0,15 мм; из стеклопластика на основе электроизоляционной ткани ЭЗ-100, пропитанной фенольформальдегидными, эпоксидными или эпокси-фенольными связующими; из титановых сплавов марок ВТ15, ВТ1-0 толщиной 0,08; 0,1 мм; из сталей марок ЭП35, 12Х18Н10Т, СН-4, ВНС-17 толщиной 0,06; 0,08 мм. Адгезивами служат: БФ-2, БФ-4, ВК-36 и др.

В таблице 1 приведены основные механические характеристики материалов, применяемых при изготовлении сотовых заполнителей [15].

Таблица 1 – Механические характеристики некоторых конструкционных материалов

Материал	$\sigma_{\text{в}}^*$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}^*$ , МПа	$E$ , $10^3$ МПа	$G$ , $10^3$ МПа	$\rho$ , МПа
Амг2-Н	$\frac{260}{325^*}$	$\frac{172,5}{240^*}$	69,0	27,0	2680
ЭП-35	950	800	190	73,6	7690
12Х18Н10Т	550	200	190	73,0	7850
ВТ-15	850	700	110	40,0	4890
ВТ1-0	400	230	110	39,0	4520
Стеклотестолит ткань ЭЗ-100	$\frac{367}{300}$	–	25,0	–	1770

В качестве материала сотового заполнителя выбран сплав ВТ-15.

В таблице 2 приведены некоторые характеристики наиболее употребительных клеев для изготовления сотовых конструкций методом склеивания.

Таблица 2 – Механические характеристики некоторых клеев

Марка клея	Состояние клея	$\tau$ , МПа			$\sigma_B^+$ , МПа	G, МПа
		T = 20° С	После 30 сут.			
			В воде	В тропич камере		
ВК-3	Жидкий	19	16,8	-	17	-
ВК-24	Пленка	18	-	-	34	-
ВК-25		25	-	-	34	-
ВК-31	Пленка (0,18 0,3мм)	35	33	30	40	380- 620
ВК-36	То же	37	34	34	45	310- 670

В качестве клея для изготовления конструкции выбирается ВК-31.

### 2.3 Выбор конфигурации сотового заполнителя

Сотовый заполнитель, располагающийся между двумя несущими слоями и скреплённый с ними неразъёмным соединением, должен удерживать последние на заданном расстоянии между ними при любых нагрузках и условиях эксплуатации изделия [16].

Основные требования к конфигурации сотового заполнителя:

– сотовый заполнитель должен воспринимать поперечные нагрузки, направленные перпендикулярно к несущим слоям, и передавать их на силовые элементы (законцовки) трёхслойной конструкции;

- сотовый наполнитель должен иметь форму поверхностей, эквидистантную форме внутренней поверхности трёхслойной конструкции;
- сотовый наполнитель должен изготавливаться из разнообразных материалов;
- сотовый наполнитель должен изготавливаться серийно в необходимых объёмах;
- цена сотового наполнителя должна быть соизмерима с ценой полуфабрикатов для изготовления других элементов трёхслойных сотовых конструкций.

В настоящее время известны следующие конструкции современных сотовых наполнителей (рисунок 3) [17].

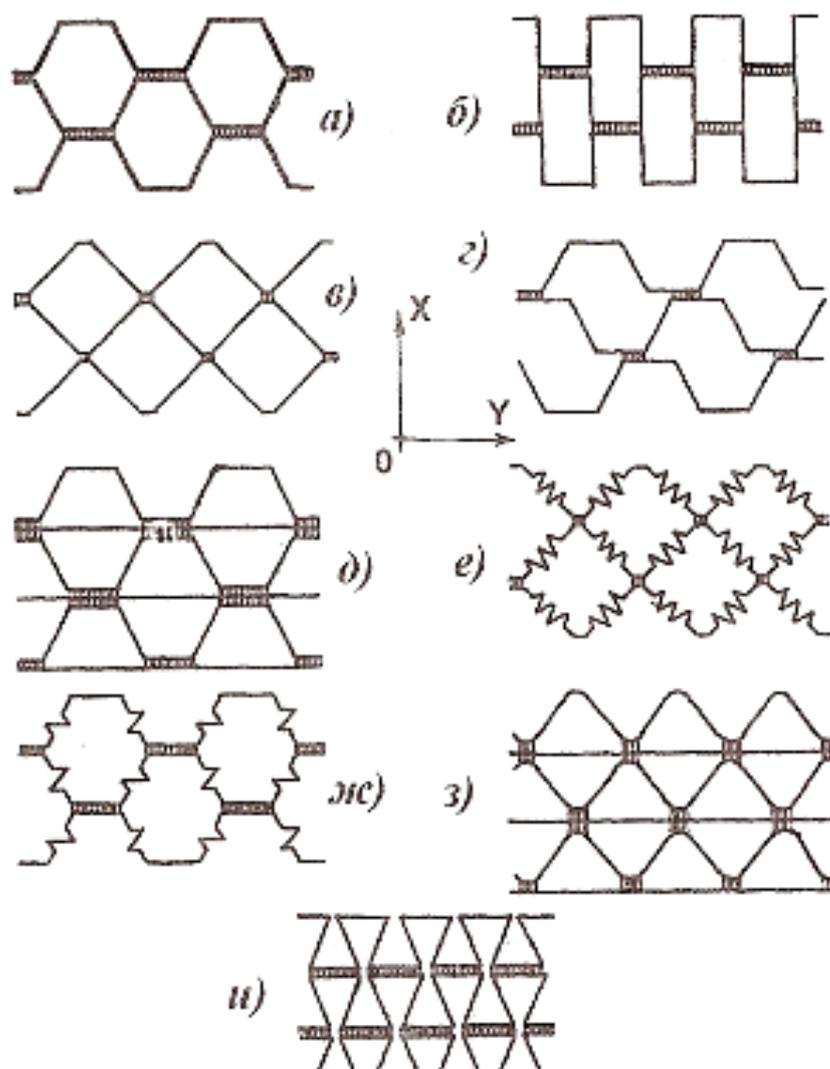


Рисунок 3 – Известные конструкции современных сотовых наполнителей [10]

С точки зрения прочности в условиях нагружения, которым подвергается КМЗ стартового стола, наиболее эффективной, технологичной и наименее материалоемкой выступает конструкция варианта А, которая и будет применяться при дальнейшей проработке проекта. Изобразим фрагмент выбранного сотового заполнителя на рисунке 4.

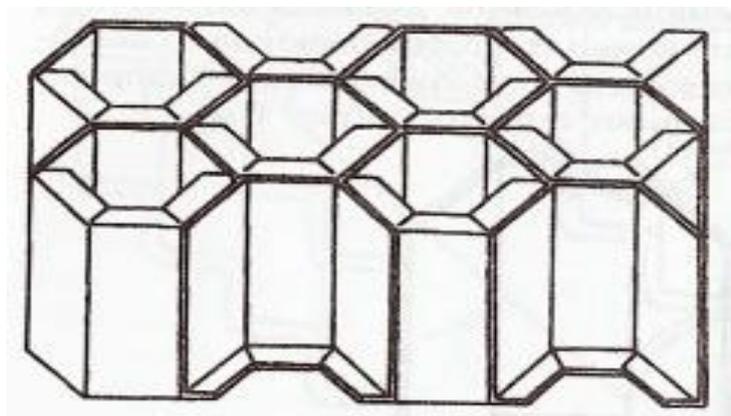


Рисунок 4 – Выбранная конфигурация сотового заполнителя

#### **2.4 Выбор конструкции окантовок элементов сотовой конструкции**

Окантовки сотовых конструкций выполняются в виде профилей открытого и закрытого контуров. Выбранные для выпускной квалификационной работы конструкции показаны на рисунке 5. Материалами законцовок служат как металлы, так и композиционные материалы (армированные пластики). В большинстве случаев материал окантовок совпадает с материалом несущих слоёв.

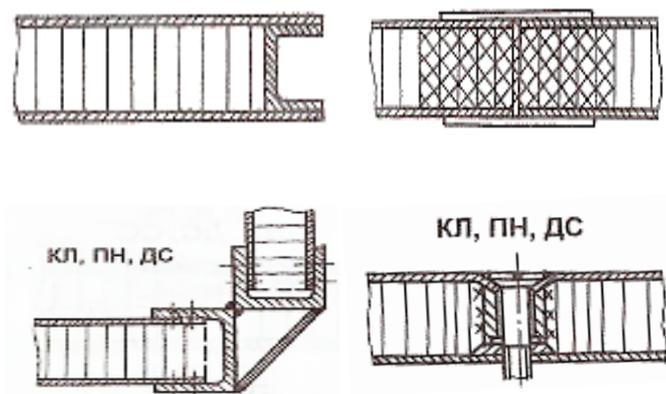


Рисунок 5 – Конструкции окантовок сотовых панелей: А – Конструкция законцовки панели, Б – конструкция узла стыковки панелей по торцам, В – конструкция узла стыковки панелей при переходе по прямому углу, Г – конструкция усиления панели для установки крепёжных элементов

## 2.5 Выбор методов изготовления сотовой конструкции

### Изготовление несущих слоёв

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы принимается решение использовать несущие слои из композиционных материалов, изготавливаемые методом классических способов и технологий производства подобных конструкций.

Несущие слои из композиционных материалов всегда являются многослойными. Каждый слой изготавливается либо из пропитанного связующим тканого полотна, либо из пропитанных связующим волокон (стеклянных, органических, углеродных), образующих однонаправленно армированную ленту. Из этих полотен и лент на плоской поверхности выкладывают первый слой будущей обшивки трёхслойной конструкции заданных размеров с заданным направлением армирующего волокна. На первый слой укладываются полотна или ленты второго слоя из заданного материала с заданным направлением армирующих волокон относительно армирующих волокон первого слоя. Процесс выкладки слоёв заканчивается по достижении их заданного числа. В результате получается «сырой» лист многослойного композиционного материала. Для превращения его в конструкционный материал

с заданными механическими характеристиками необходимо отвердить связующее вещество при определённой температуре и давлении [11-12].

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы принято решение использовать автоклавное прессование (рисунок 6).

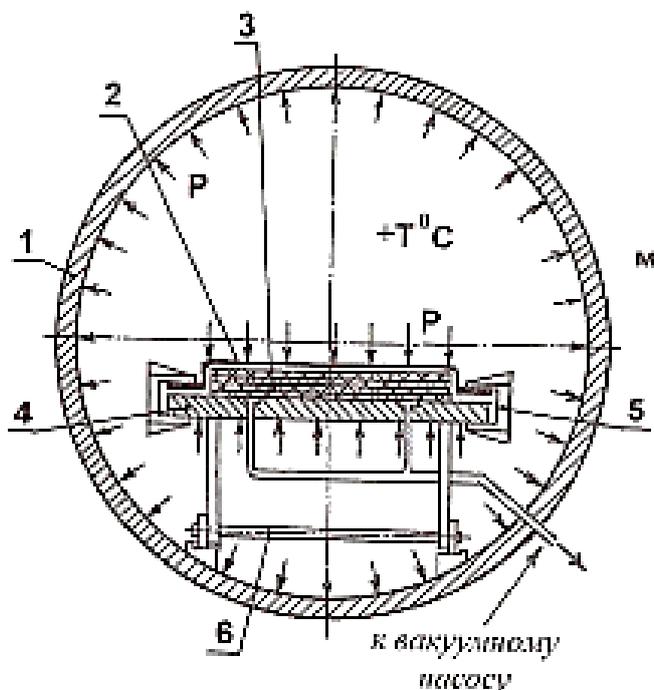


Рисунок 6 – Схема формования деталей из композитов в автоклаве (1 – автоклав, 2 – резиновый чехол, 3 – формируемый лист, 4 – плита, 5 – прижим чехла, 6 – тележка)

### Изготовление сотового заполнителя

Наиболее технологичным методом для изготовления сотовых заполнителей выступает метод растяжения пакета, так как он может быть механизирован и автоматизирован, при нём упрощается механическая обработка сот и обеспечивается низкая стоимость сотовых заполнителей. Он и выбран как основной метод изготовления сотового заполнителя в рамках выпускной квалификационной работы.

Реализация метода в опытном производстве заключается в последовательном выполнении следующих операций:

- обезжиривание и сушка листового или рулонного материала;

- нанесение клеевых полос;
- разрезка материала;
- образование сборочных отверстий;
- сборка пакетов сотовых заполнителей;
- склеивание пакета;
- разрезка пакетов на заготовки;
- растяжение заготовки;
- пропитка сотопанели;
- термическая обработка сотопанели;
- разрезка пропитанных сотопанелей;
- механическая обработка рабочих плоскостей сотопанелей;
- разрезка материалов заполнителя на полосы;
- разрезка полос материала на заготовки и пробивка сборочных отверстий;
- разметка линий сгиба заготовок;
- нанесение клея;
- сборка ступенчатого листа;
- нанесение клея на ступенчатые листы;
- сборка пакета заполнителя.

#### Изготовление сотовой конструкции

Присоединение обшивок клееных панелей к сотовому блоку чаще всего производят в автоклавах или контейнерах. Схема сборки элементов панели в контейнер для склеивания показана на рисунке 7 [16].

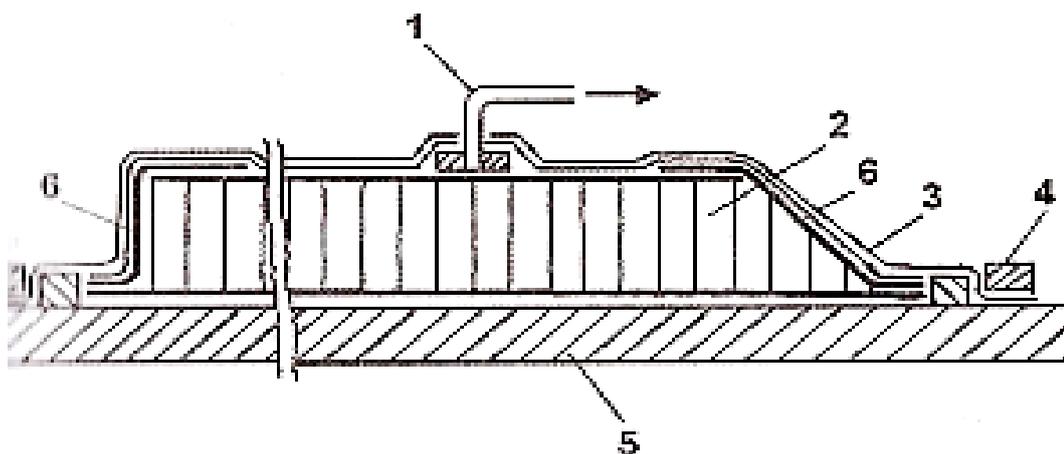


Рисунок 7 – Схема сборки контейнера при склеивании панели

Схема:

- 1) Трубопровод к вакуумному насосу.
- 2) Сотовая панель.
- 3) Вакуумный мешок.
- 4) Прижим.
- 5) Технологическая плита (основание).
- 6) Силовые элементы панели.

## 2.6 Расчёт основных проектных характеристик сотовой конструкции

В основе всех теорий механики твёрдых деформируемых тел лежит модель их реакции на внешние воздействия. Изучение реакции тела на внешние нагрузки начинается с определения характера возникающих в нём внутренних сил сопротивления этим нагрузкам.

На ранних этапах разработки теории упругости принимается, что каждая внутренняя частица тела испытывает действие нормальных напряжений растяжения или сжатия, а также действие касательных напряжений. Такое действие внутренних силовых факторов показано на рисунке 8. При этом считается, что указанные напряжения равномерно распределяются по площади соответствующих граней внутреннего объёмного элемента тела. На рисунке указаны положительные направления действия внутренних силовых факторов [10].

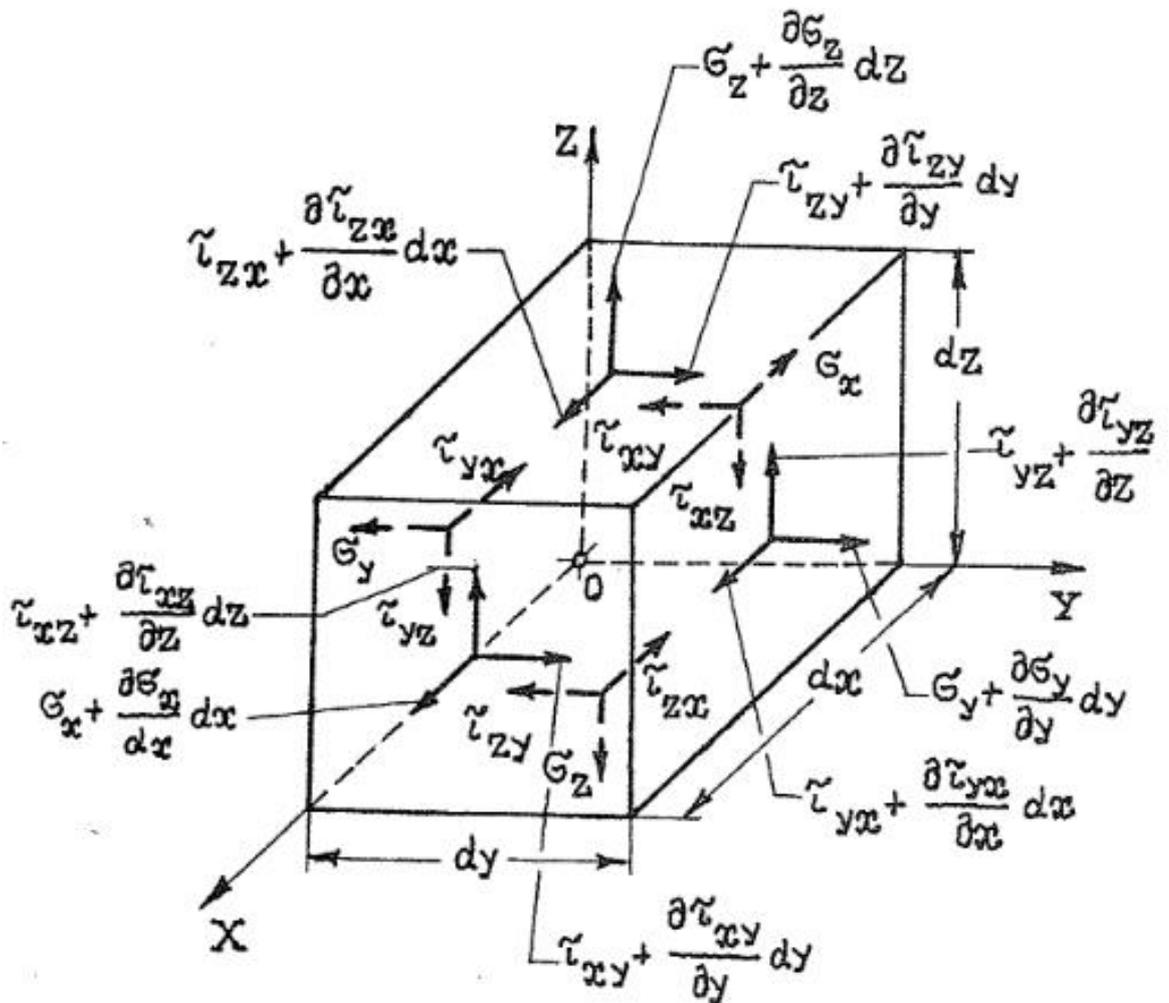


Рисунок 8 – Положительные направления действия внутренних силовых факторов на внутренний объёмный элемент нагруженного тела в декартовой системе координат

Для нагруженного тела, в котором внутренние частицы испытывают силовые факторы, показанные на предыдущем рисунке, можно записать группу физических уравнений в следующем виде (рисунок 9-10).

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x = & b_{1,1}\sigma_x - b_{1,2}\sigma_y - b_{1,3}\sigma_z + \\
& + |b_{1,4} \frac{1}{2} \left( \tau_{yx} + \tau_{xy} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx \right) + b_{1,5} \frac{1}{2} \times \\
& \times \left( \tau_{yz} + \tau_{zy} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dy + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} dz \right) + \\
& + b_{1,6} \frac{1}{2} \left( \tau_{xz} + \tau_{zx} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} dx + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) |;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_y = & -b_{2,1}\sigma_x + b_{2,2}\sigma_y - b_{2,3}\sigma_z + \\
& + |b_{2,4} \frac{1}{2} \left( \tau_{yx} + \tau_{xy} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx \right) + b_{2,5} \frac{1}{2} \times \\
& \times \left( \tau_{yz} + \tau_{zy} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dy + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} dz \right) + \\
& + b_{2,6} \frac{1}{2} \left( \tau_{xz} + \tau_{zx} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} dx + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) |;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_z = & -b_{3,1}\sigma_x - b_{3,2}\sigma_y + b_{3,3}\sigma_z + \\
& + |b_{3,4} \frac{1}{2} \left( \tau_{yx} + \tau_{xy} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx \right) + b_{3,5} \frac{1}{2} \times \\
& \times \left( \tau_{yz} + \tau_{zy} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dy + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} dz \right) + \\
& + b_{3,6} \frac{1}{2} \left( \tau_{xz} + \tau_{zx} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} dx + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) |;
\end{aligned}$$

Рисунок 9 – Физические уравнения [10]

$$\gamma_{xy} = b_{4.1} \frac{1}{2} \left( \tau_{yx} + \tau_{xy} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx \right);$$

$$\gamma_{yz} = b_{5.1} \frac{1}{2} \left( \tau_{yz} + \tau_{zy} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dy + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} dz \right);$$

$$\gamma_{zx} = b_{6.1} \frac{1}{2} \left( \tau_{zx} + \tau_{xz} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} dx + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right);$$

$$\omega_x = b_{7.1} \frac{1}{2} \left( \tau_{zy} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} dz - \tau_{yz} - \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dy \right);$$

$$\omega_y = b_{8.1} \frac{1}{2} \left( \tau_{zx} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz - \tau_{xz} - \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} dx \right);$$

$$\omega_z = b_{9.1} \frac{1}{2} \left( \tau_{xy} + \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} dx - \tau_{yx} - \frac{1}{2} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right).$$

Рисунок 10 – Физические уравнения [10]

На рисунках 9-10 использованы следующие обозначения:

$\varepsilon_i (i = x, y, z)$  – линейные деформации тела в направлении координатных осей, указанных в подстрочных индексах;

$\gamma_{ij} (i, j = x, y, z; i \neq j)$  – угловые деформации тела в координатных плоскостях, указанных в подстрочных индексах;

$\omega_i (i = x, y, z)$  – углы поворота объёмных элементов тела относительно координатных осей, указанных в подстрочных индексах;

$b_{i,j}$  – коэффициенты пропорциональности (упругие постоянные конструкционного материала), определяющие долю вклада соответствующего внутреннего силового фактора в соответствующую деформацию тела. Первый подстрочный индекс в коэффициентах обозначает порядковый номер уравнения

в группе уравнений, а второй – порядковый номер коэффициента в данном уравнении.

Для решения системы уравнений необходимо использовать метод линеаризации. Например, для изотропных тел уравнения связи напряжений и деформаций (обобщённого закона Гука) можно записать в виде системы ДУ, показанной на рисунке 11.

$$\begin{aligned}\varepsilon_x^{+(-)} &= \frac{1}{E^{+(-)}} \left[ \sigma_x^{+(-)} - \mu^{+(-)} (\sigma_y^{+(-)} + \sigma_z^{+(-)}) \right]; & \gamma_{xy} &= \tau_{xy} / G; \\ \varepsilon_y^{+(-)} &= \frac{1}{E^{+(-)}} \left[ \sigma_y^{+(-)} - \mu^{+(-)} (\sigma_x^{+(-)} + \sigma_z^{+(-)}) \right]; & \gamma_{yz} &= \tau_{yz} / G; \\ \varepsilon_z^{+(-)} &= \frac{1}{E^{+(-)}} \left[ \sigma_z^{+(-)} - \mu^{+(-)} (\sigma_x^{+(-)} + \sigma_y^{+(-)}) \right]; & \gamma_{xz} &= \tau_{xz} / G.\end{aligned}$$

Рисунок 11 – Система дифференциальных уравнений для изотропных тел [10]

Решение указанной системы уравнений выполняется численно, методом Рунге-Кутты IV порядка (система Mathcad, решатель rkfixed). Фрагмент результатов приведен на рисунках 12-20. Используется специализированный расчётный файл для реализации метода конечных элементов в Mathcad.

```

ORIGIN := 1
RZ := 2      размерность задачи - плоская задача теории
              упругости
NN := 3      число узлов в каждом элементе

размеры пластины
W := 100 мм   n_w := 20
H := 20 мм   n_h := 4
t := 1 мм

параметры материала
E := 7·104 МПа   μ := 0.3   G :=  $\frac{E}{2(1 + \mu)} = 2.692 \times 10^4$ 
нагрузка по правому краю равномерно по узлам, равнодействующая
Force := 1000 Н

```

Рисунок 12 – Протокол расчёта в Mathcad

Вычисление числа узлов и элементов

$$n_{\text{nodes}} := (n_w + 1) \cdot (n_h + 1) = 105$$

$$n_{\text{elem}} := 2 \cdot n_w \cdot n_h = 160$$

Вычисление узловых координат при сетке  $h_w \times h_h$

$$i := 1..n_w + 1 \quad j := 1..n_h + 1$$

$$NC_{(j-1) \cdot (n_w+1) + i, 1} := (i - 1) \cdot \frac{W}{n_w} \quad \begin{array}{l} X \text{ координаты узлов} \\ \mathbf{NodeCoordinat} \end{array}$$

$$NC_{(j-1) \cdot (n_w+1) + i, 2} := H - (j - 1) \cdot \frac{H}{n_h} \quad \begin{array}{l} Y \text{ координаты узлов} \end{array}$$

Построение матрицы узлов треугольных элементов, перечисление узлов против часовой стрелки начиная с наименьшего номера

$$i := 1..n_w \quad j := 1..n_h$$

$$\text{ind}_{2, [(j-1) \cdot n_w + i] - 1, 1} := (j - 1) \cdot (n_w + 1) + i$$

$$\text{ind}_{2, [(j-1) \cdot n_w + i] - 0, 1} := (j - 1) \cdot (n_w + 1) + i + 1$$

$$\text{ind}_{2, [(j-1) \cdot n_w + i] - 1, 2} := j \cdot (n_w + 1) + i$$

$$\text{ind}_{2, [(j-1) \cdot n_w + i] - 0, 2} := j \cdot (n_w + 1) + i$$

$$\text{ind}_{2, [(j-1) \cdot n_w + i] - 1, 3} := (j - 1) \cdot (n_w + 1) + i + 1$$

$$\text{ind}_{2, [(j-1) \cdot n_w + i] - 0, 3} := j \cdot (n_w + 1) + i + 1$$

Рисунок 13 – Протокол расчёта в Mathcad [9]

Назначение номеров степеней свободы для узлов, 0 - для закрепления

$$\begin{aligned}
 p &:= 1..n_{\text{nodes}} & q &:= 1..RZ & \text{DOF}_{p,q} &:= 1 \\
 p &:= 1..n_h + 1 \\
 \text{DOF}_{(p-1) \cdot (n_w+1) + 1, 1} &:= 0 & & & & \text{закрепление узлов по левой} \\
 \text{DOF}_{(p-1) \cdot (n_w+1) + 1, 2} &:= 0 & & & & \text{границе по X и нижнего} \\
 & & & & & \text{левого узла по Y} \\
 \text{DOF}_{n_h \cdot (n_w+1) + 1, 2} &:= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{NDOF} &:= \left| \begin{array}{l} \text{NoDOF} \leftarrow 0 \\ \text{for } p \in 1..n_{\text{nodes}} \\ \quad \text{for } q \in 1..RZ \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} \text{Result}_{p,q} \leftarrow \left| \begin{array}{l} 0 \text{ if } \text{DOF}_{p,q} = 0 \\ (\text{NoDOF} + 1) \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ \text{NoDOF} \leftarrow \text{NoDOF} + \text{DOF}_{p,q} \end{array} \right. \\ \text{Result} \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Распределение нагрузки по узловым степеням свободы (по узлам правого края пластины равномерно, вертикальные составляющие), равнодействующая = Force

$$\begin{aligned}
 p &:= 1..n_{\text{nodes}} \\
 q &:= 1..RZ \\
 P_{p,q} &:= 0 & & \text{обнуление нагрузки по всем узлам} \\
 p &:= 1..n_h + 1 \\
 P_{p \cdot (n_w+1), 2} &:= \frac{\text{Force}}{n_h + 1} & & \text{ задание вертикальных сил по узлам} \\
 & & & \text{ правого края}
 \end{aligned}$$

Рисунок 14 – Протокол расчёта в Mathcad [9]

Вычисление коэффициентов функции формы

$$e := 1..n_{elem}$$

$a_{e,1} := NC(\text{ind}_{e,2},1) \cdot NC(\text{ind}_{e,3},2) - NC(\text{ind}_{e,3},1) \cdot NC(\text{ind}_{e,2},2)$	$ai = xj \cdot ym - xm \cdot yj$	
$a_{e,2} := NC(\text{ind}_{e,3},1) \cdot NC(\text{ind}_{e,1},2) - NC(\text{ind}_{e,1},1) \cdot NC(\text{ind}_{e,3},2)$	$aj = xm \cdot yi - xi \cdot ym$	$i > j > m > i$
$a_{e,3} := NC(\text{ind}_{e,1},1) \cdot NC(\text{ind}_{e,2},2) - NC(\text{ind}_{e,2},1) \cdot NC(\text{ind}_{e,1},2)$	$am = xi \cdot yj - xj \cdot yi$	
$b_{e,1} := NC(\text{ind}_{e,2},2) - NC(\text{ind}_{e,3},2)$	$bi = yj - ym$	
$b_{e,2} := NC(\text{ind}_{e,3},2) - NC(\text{ind}_{e,1},2)$	$bj = ym - yi$	
$b_{e,3} := NC(\text{ind}_{e,1},2) - NC(\text{ind}_{e,2},2)$	$bm = yi - yj$	
$c_{e,1} := NC(\text{ind}_{e,3},1) - NC(\text{ind}_{e,2},1)$	$ci = xm - xj$	
$c_{e,2} := NC(\text{ind}_{e,1},1) - NC(\text{ind}_{e,3},1)$	$cj = xi - xm$	$i > j > m > i$
$c_{e,3} := NC(\text{ind}_{e,2},1) - NC(\text{ind}_{e,1},1)$	$cm = xj - xi$	

Рисунок 15 – Нахождение коэффициентов в Mathcad [9]

Вычисление площадей элементов

$$e := 1..n_{elem}$$

$$F_e := \frac{1}{2} \cdot (a_{e,1} + a_{e,2} + a_{e,3})$$

Контроль - сумма площадей всех элементов должна равняться площади пластины

$$\sum_{e=1}^{n_{elem}} F_e = 2 \times 10^3 \qquad W \cdot H = 2 \times 10^3$$

Рисунок 16 – Расчёта площадей элементов в Mathcad [9]

Выражение для функции формы каждого элемента

$$e := 1..n_{elem}$$

$$\psi(e, r, x, y) := a_{e,r} + b_{e,r} \cdot x + c_{e,r} \cdot y \quad r = 1, 2, 3 \text{ - соответствует } i, j, m$$

$$\alpha_r(e, r, x, y) := \frac{1}{2 \cdot F_e} \begin{pmatrix} \psi(e, r, x, y) & 0 \\ 0 & \psi(e, r, x, y) \end{pmatrix}$$

$$\alpha(e, x, y) := \text{augment}(\alpha_r(e, 1, x, y), \alpha_r(e, 2, x, y), \alpha_r(e, 3, x, y)) \quad r = 1, 2, 3 == i, j, m$$

$$\beta_r(e, r) := \frac{1}{2 \cdot F_e} \begin{pmatrix} b_{e,r} & 0 \\ 0 & c_{e,r} \\ c_{e,r} & b_{e,r} \end{pmatrix}$$

$$\beta(e, x, y) := \text{augment}(\beta_r(e, 1), \beta_r(e, 2), \beta_r(e, 3))$$

$$\kappa := \frac{E}{1 - \mu^2} \begin{pmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \mu}{2} \end{pmatrix}$$

Построение матриц жесткости отдельных элементов

$$r := 1..NN$$

$$s := 1..NN$$

$$Kelem(e, r, s) := t \cdot F_e \cdot \beta_r(e, r)^T \cdot \kappa \cdot \beta_r(e, s)$$

Рисунок 17 – Протокол расчёта в Mathcad [9]

Формирование сокращенной матрицы жесткости конструкции

$DOF_{count} := \max(NDOF) = 200$       размер матрицы жесткости соответствует числу возможных ненулевых перемещений

```

Kαα :=
  for i ∈ 1..DOFcount
    for j ∈ 1..DOFcount
      Ki,j ← 0
    for e ∈ 1..nelem
      for p ∈ 1..NN
        r ← inde,p
        for i ∈ 1..RZ
          A ← NDOFr,i
          (continue) if A = 0
          for q ∈ 1..NN
            s ← inde,q
            for j ∈ 1..RZ
              B ← NDOFs,j
              (continue) if B = 0
              KA,B ← KA,B + Kelem(e,p,q)i,j
    K
    
```

Формирование матрицы Р альфа

```

Pα :=
  for i ∈ 1..DOFcount
    Pαi ← 0
  for p ∈ 1..nnodes
    for q ∈ 1..RZ
      A ← NDOFp,q
      (continue) if A = 0
      PαA ← Pp,q
  Pα
    
```

Рисунок 18 – Протокол расчёта в Mathcad [9]

Вычисление узловых перемещений из решения системы уравнений

$$V_{\alpha} := \text{Isolve}(K_{\alpha\alpha}, P_{\alpha})$$

Построение полной матрицы перемещений

$$V := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..DOF_{count} \\ \quad V_i \leftarrow 0 \\ \quad \text{for } p \in 1..n_{nodes} \\ \quad \quad \text{for } q \in 1..RZ \\ \quad \quad \quad \left| \begin{array}{l} A \leftarrow NDOF_{p,q} \\ \text{(continue) if } A = 0 \\ V_{p,q} \leftarrow V_{\alpha A} \end{array} \right. \end{array} \right. \\ V$$

Построение матрицы узловых перемещений элементов

$$V_{elem} := \left| \begin{array}{l} \text{for } e \in 1..n_{elem} \\ \quad \text{for } i \in 1..RZ \cdot NN \\ \quad \quad V_{elem_{e,i}} \leftarrow 0 \\ \quad \text{for } e \in 1..n_{elem} \\ \quad \quad \text{for } i \in 1..NN \\ \quad \quad \quad \left| \begin{array}{l} r \leftarrow ind_{e,i} \\ \text{for } j \in 1..RZ \\ \quad V_{elem_{e,(i-1) \cdot RZ + j}} \leftarrow V_{r,j} \end{array} \right. \end{array} \right. \\ V_{elem}$$

Рисунок 19 – Протокол расчёта в Mathcad [9]

## Построение функции перемещений внутри конечных элементов

Сначала нужно определить по координатам точки номер элемента

$$\text{GetElemNum}(x, y) := \begin{cases} \text{for } e \in 1..n_{\text{elem}} \\ \quad \text{for } p \in 1..NN \\ \quad \quad T_p \leftarrow \text{ind}_{e,p} \\ \quad \quad Q1 \leftarrow x \cdot (NC_{T_2,2} - NC_{T_1,2}) + y \cdot (NC_{T_1,1} - NC_{T_2,1}) + NC_{T_1,2} \cdot NC_{T_2,1} - NC_{T_1,1} \cdot NC_{T_2,2} \\ \quad \quad Q2 \leftarrow x \cdot (NC_{T_3,2} - NC_{T_2,2}) + y \cdot (NC_{T_2,1} - NC_{T_3,1}) + NC_{T_2,2} \cdot NC_{T_3,1} - NC_{T_2,1} \cdot NC_{T_3,2} \\ \quad \quad Q3 \leftarrow x \cdot (NC_{T_1,2} - NC_{T_3,2}) + y \cdot (NC_{T_3,1} - NC_{T_1,1}) + NC_{T_3,2} \cdot NC_{T_1,1} - NC_{T_3,1} \cdot NC_{T_1,2} \\ \quad \quad (\text{return } e) \text{ if } Q1 \leq 0 \wedge Q2 \leq 0 \wedge Q3 \leq 0 \\ 0 \end{cases}$$

$$U(x, y) := \begin{cases} \text{NumEl} \leftarrow \text{GetElemNum}(x, y) \\ \alpha(\text{NumEl}, x, y) \cdot (V_{\text{elem}}^T)^{\langle \text{NumEl} \rangle} \end{cases}$$

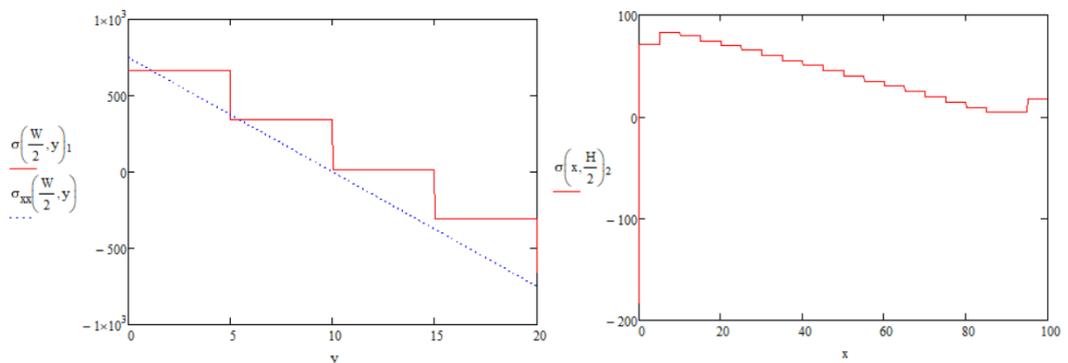
## Определение деформаций

$$\underline{\underline{\varepsilon}}(x, y) := \begin{cases} \text{NumEl} \leftarrow \text{GetElemNum}(x, y) \\ \beta(\text{NumEl}, x, y) \cdot (V_{\text{elem}}^T)^{\langle \text{NumEl} \rangle} \end{cases}$$

## Определение напряжений

$$\sigma(x, y) := \kappa \cdot \varepsilon(x, y)$$

$$\sigma_{xx}(x, y) := -12 \frac{\text{Force}}{H^3} \cdot x \cdot \left( y - \frac{H}{2} \right)$$



$$sxx(x, y) := \sigma(x, y)_1$$

$$syy(x, y) := \sigma(x, y)_2$$

$$sxy(x, y) := \sigma(x, y)_3$$

$$Sxx := \text{CreateMesh}(sxx, 0, W, 0, H, n_w, n_h)$$

$$Syy := \text{CreateMesh}(syy, 0, W, 0, H, n_w, n_h)$$

$$Sxy := \text{CreateMesh}(sxy, 0, W, 0, H, n_w, n_h)$$

Рисунок 20 – Протокол расчёта в Mathcad [10]

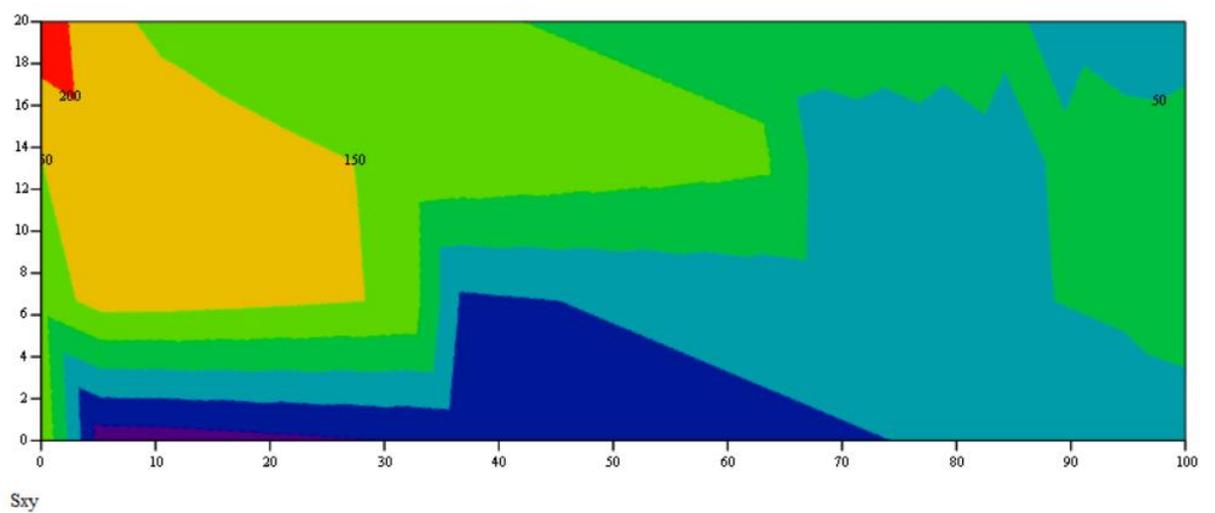
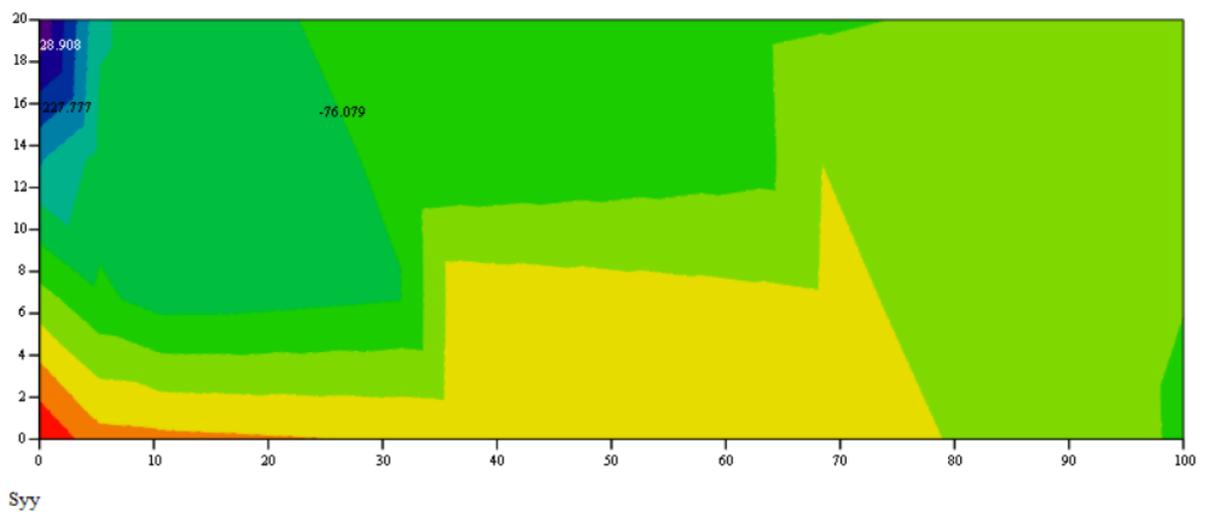
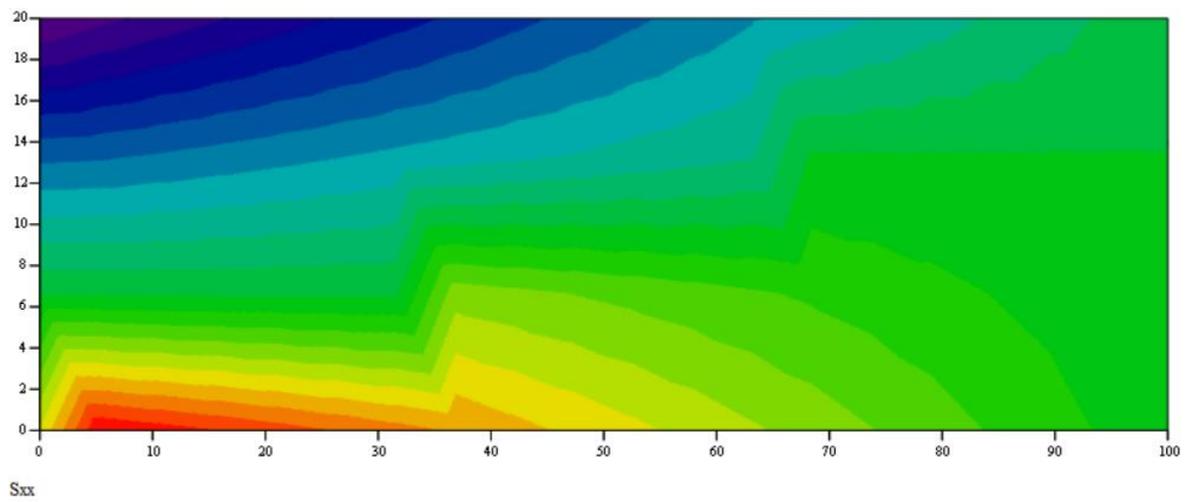


Рисунок 21 – Полученные показатели в Mathcad

Таким образом, в результате расчёта подтверждены характеристики разрабатываемых сотовых панелей, которые обеспечивают необходимую прочность комплекта металлозащиты стартового стола.

Изготовленные детали и конструкции должны маркироваться согласно требованиям КД.

Вторая глава выпускной квалификационной работы представляет собой проектно-конструкторскую часть. Был выбран прототип сотовой конструкции, которым выступает КМЗ на американских кораблях Х-33 и «Венчурстар», поскольку данная конструкция позволяет выдержать статические нагрузки, обеспечить нескользящие свойства, а также обеспечить необходимую теплозащиту в условиях Дальнего Востока. В качестве материала выбран сотового заполнителя выбран сплав ВТ-15. В качестве клея для изготовления конструкции выбирается ВК-31. Из рассмотренных типов конфигурации сотового заполнителя принято решение использовать заполнитель шестигранного профиля, располагаемый в шахматном порядке, так как он позволяет обеспечить необходимые прочностные характеристики. С помощью численного решения уравнений методом Рунге-Кутты IV порядка был произведён предварительный прочностной расчёт плитки, который показал, что конструкция выдержит прилагаемые нагрузки в наихудших температурных условиях. Также был выбран метод изготовления сотовой конструкции (метод склеивания), рассмотрены особенности сборки конструкции и методы контроля качества.

### **3.1 Процессы в наше время**

В настоящий момент большинство производителей преследует классические способы и технологии по созданию сотового заполнителя.

Подобные способы, в основном, заключаются в производстве на крупных партиях или сериях с немалым персоналом, большими площадями складов и рабочих пространств. В это же время и оборудование (установки) являются весьма крупными, что имеют в своей работе нестандартные движения и траекторию. А также стоит отметить и экологическую защиту, которая выстроена по методу централизованной системы, так как в процессе изготовления используется большое количество растворителя.

Подобное производство специализируется на изготовлении крупных блоков, что состоят из сотового наполнителя. В дальнейшем они отправляются на иные предприятия. Основной целью здесь является создание плоских трехслойных панелей как раз-таки из данных блоков.

Сам процесс изготовления включает в себя резку сначала самих блоков, а дальше раскрой пластин. В дальнейшем они объединяются для формирования центра (сердца) панели. Следующим этапом становится соединение обшивки с данной сердцевиной, откуда мы и получаем готовый продукт.

### **3.2 Оценка производства, недостатки и рекомендации**

Переходя к анализу производства в целом, стоит сказать, что везде имеются и недостатки, в том числе и способы по изготовлению сот и панелей не остались в стороне.

Сначала стоит отметить, что есть существенная нужда в смачивании (пропитке) различными растворами самих блоков. Откуда возникает явная проблема в создании схожести (однообразия) показателей по всей части формы из сотового наполнителя сопряженная с реально немалым количеством испарения растворителя.

Процессы резки на пластины сопровождаются обильными остатками мусора, что относится и к укладке данных пластов в многослойные панели.

К еще одному недостатку можно отнести то, что устойчивость самого процесса страдает из-за различных нареканий и невозможности контроля параметров в весьма крупном процессе производства, здесь же уменьшается и сама эффективность. Отсюда возникают и проблемы в экономическом плане. Связано это с тем, что очень легкое сырье и материал приходится доставлять на большие расстояния заказчикам или потребителям.

Отталкиваясь от недостатков, что были связаны с классическим методом, нужно прийти к другому способу изготовления нужных панелей в 3х слойном виде. Хорошим вариантом здесь является конвейер. Однако рассматривается именно компактный вариант, что имеет различные модули.

За счет подобного оборудования мы получаем упрощенный способ, что позволяет на одной линии использовать и сборку панели, и производство самой пластины заполнителя.

Выбранный вариант по своим характеристикам позволяет серьезно увеличить КПД и экономичность всего производства. [15-17].

### **3.3 Описание линии производства сотового заполнителя**

Ниже представлены различные схемы и особенности данной технологии:

– На рисунке 21 представлено как может выглядеть линия производства нашего сотового заполнителя в порядке формовки, растягивания, усиления и покрытия.

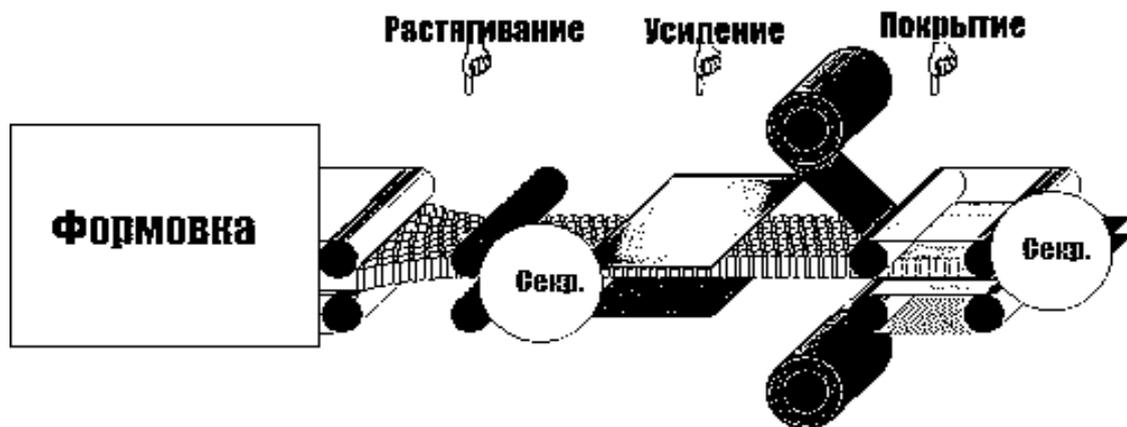


Рисунок 21 – Примерный образ линии

– На рисунке 22 представлен стандартный вариант. Числами указаны модули конструкции: 1 – подача, 2 – транспортировка, 3 – тестирование. У всех частей имеются различные функции и могут быть связаны друг с другом в абсолютно разных вариантах и комбинациях. Такие перетасовки дают возможность сильно влиять на сам процесс и в малые сроки устранять неполадки или производить замену частей (модулей).

На данной линии предусмотрены факторы защиты персонала и самым важным качеством является именно контроль за качеством в любой момент времени без прекращения работ по созданию панелей.

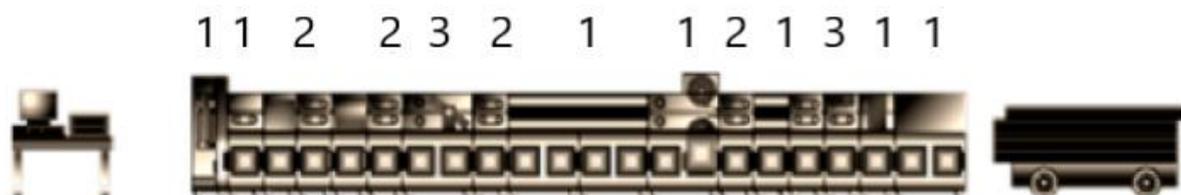


Рисунок 22 – Представление линии в модулях

Если же говорить об особенностях, в целом, то здесь важно отметить простоту и доступность, возможность работать при абсолютно различных степенях сложности и непрерывность процесса. И всё это возможно реализовать без высоких требований к месту работы.

### 3.4 Процесс воссоздания структуры сотовой конструкции

Зная объем работы в течении производства, чаще всего составляется план. Исходя из него происходит закрепление за каким-либо технологическим помещением, в котором будет происходить создание и формование сотовой структуры.

Существует отработанный порядок (правило) по созданию пакетов заполнителя. Данные пакеты выполняются из материалов неметаллического формата. Ниже на рисунке 23 можно увидеть план и структуру такого технологического процесса.

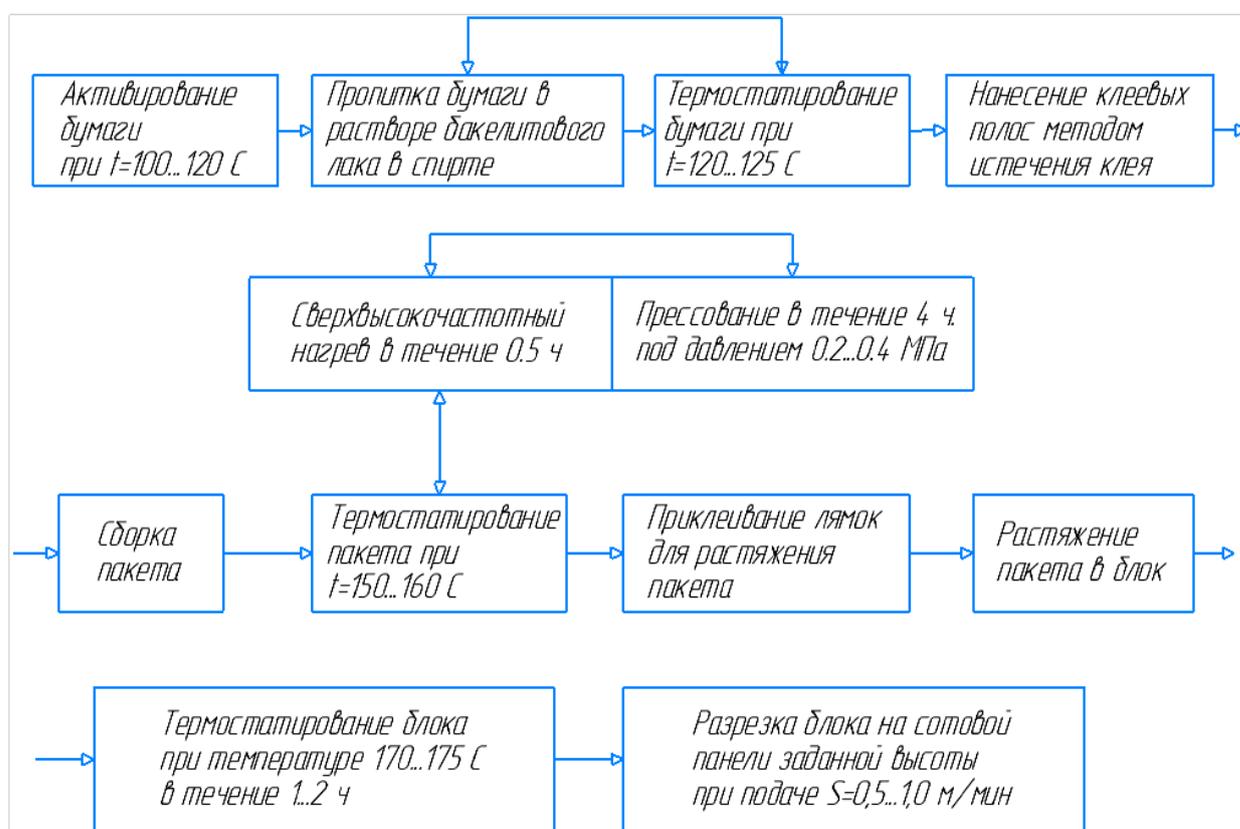


Рисунок 23 – Наглядная блочная схема по изготовлению пакетов

Данную схему можно считать общего вида. Но важным является то, что данный процесс может меняться. Обуловлено это специфическими аспектами используемого оборудования.

### **3.5 Используемое оборудование. Порядок производства**

Для склеивания пакета можно использовать нагреватели. Однако они должны быть из разряда высокочастотников. Данная аппаратура имеет свои преимущества. К таким плюсам можно отнести увеличение интенсивности самой полимеризации, что позволяет прогревать изолятор (диэлектрик) более равномерно. Также подобное оборудование дает возможность сделать блок заполнителя большим в размерах за счет увеличения количества листов из полиамида, и в следствие этого повысится прочностная характеристика при неравномерных действиях.

Существует технология растяжения. Она является важной частью при производстве сотового заполнителя. Сложенные пакеты формируются в блоки и при помощи специального инструмента фиксируются в растянутом состоянии.

Число листов и сами размеры сот играют важную роль определении силы, с которой растягиваются данные пакеты. Однако стоит учитывать, что данные пакеты могут иметь в остатке небольшие изменения в форме (контракцию). Вне зависимости от размеров ячеек и толщины материала само уменьшение ширины пакета может составлять примерно 65-75% от первоначальной.

Также известно, что получение формы с шестью гранями требует в 2 раза меньше силы растяжения, чем для получения формовки с прямыми углами.

На постоянной основе любые материалы, сырье и компоненты должны быть под контролем. Это должно происходить и в момент прихода на производство, и в моменты замены какой-либо партии или окончания сроков гарантии.

Чтобы получить нужную форму и размеры заполнителя можно использовать различное оборудование будь то станки, либо печи или 3д печать. Важным аспектом является заданная программа, по которой будет действовать и давать команды ПО.

В создании нашей модели большую роль играет именно оборудование, с помощью которого мы получаем нужный продукт. По нанесению клея со всеми важными факторами для изготовления можно использовать автоматы, которые

создают сотовый внутренку из сплавов алюминия и различной фольги с большой точностью.

Все заготовки должны проходить через метод растяжения, после которого у нас будет устойчивая структура. Здесь нам помогут роботы и экспандеры, что позволят и проводить формовку, и сушку, и различные подгонки. В дальнейшем созданные объекты проходят проверки и при допуске могут отправляться на транспортировку.

### 3.6 Разработка комплекта конструкторской документации

В процессе работы над дипломным проектом был сформирован комплект конструкторской документации по результатам теоретических расчётов, проведённых в предыдущей главе.

Компоновочная схема спроектированной плитки, составляющей КМЗ, представлена на рисунке 24.

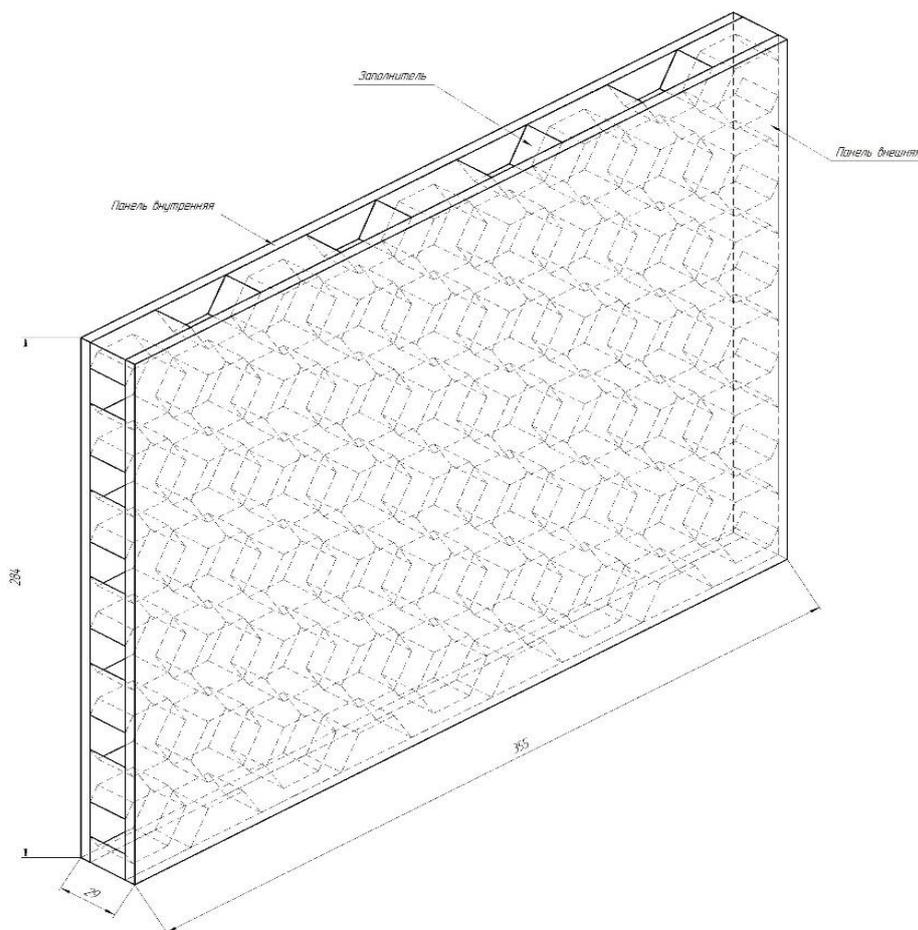
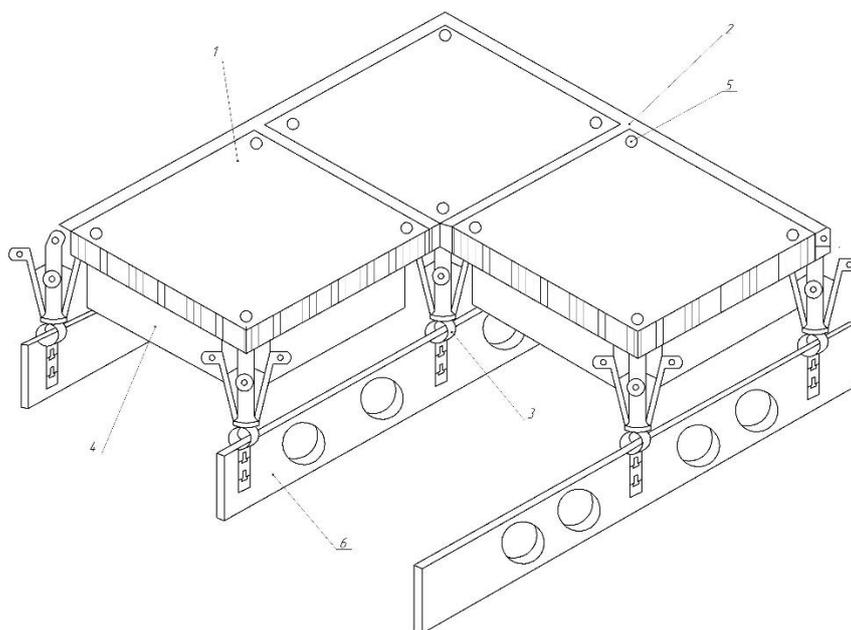


Рисунок 24 – Компоновочная схема плитки КМЗ



Чертёж прототипа представлен на рисунке 27.

### КОНСТРУКЦИЯ СОТОВОЙ ТЕПЛОЗАЩИТЫ НА КОРАБЛЕ X-33 / ВЕНЧУРСТАР



- |  |  |
|--|--|
| 1 - Металлическая сотовая панель             | 4 - Завернутая в фольгу изоляция             |
| 2 - Уплотнение между панелями                | 5 - Пробки на крепежных элементах панели     |
| 3 - Стойки с розетками для крепления панелей | 6 - Внешний силовой элемент криогенного бака |

Рисунок 27 – Чертёж прототипа КМЗ

### 3.7 Расчёт КМЗ на прочность в Solidworks

Для проверки прочности разработанного КМЗ дополнительно был проведён прочностной расчёт с помощью дополнения Simulation, являющегося составной частью Solidworks.

Из аналогичных программ для расчёта могут использоваться: Компас-3D, ADEM, Autodesk Inventor, Siemens NX. Выбор программного обеспечения был основан на следующих преимуществах программы по отношению к другим:

- наличие опыта в результате использования программы при прохождении практик;
- доступность учебной версии, включая конечноэлементные пакеты для расчётов на прочность и жёсткость;
- доступный интерфейс;

- возможность внести корректировки без существенных потерь времени с автоматизированным перестроением изделия;
- возможность проработки технологических процессов изготовления изделия с помощью ЧПУ посредством САМ-пакета SolidCAM.

Трёхмерная модель сотового заполнителя представлена на рисунке 28.

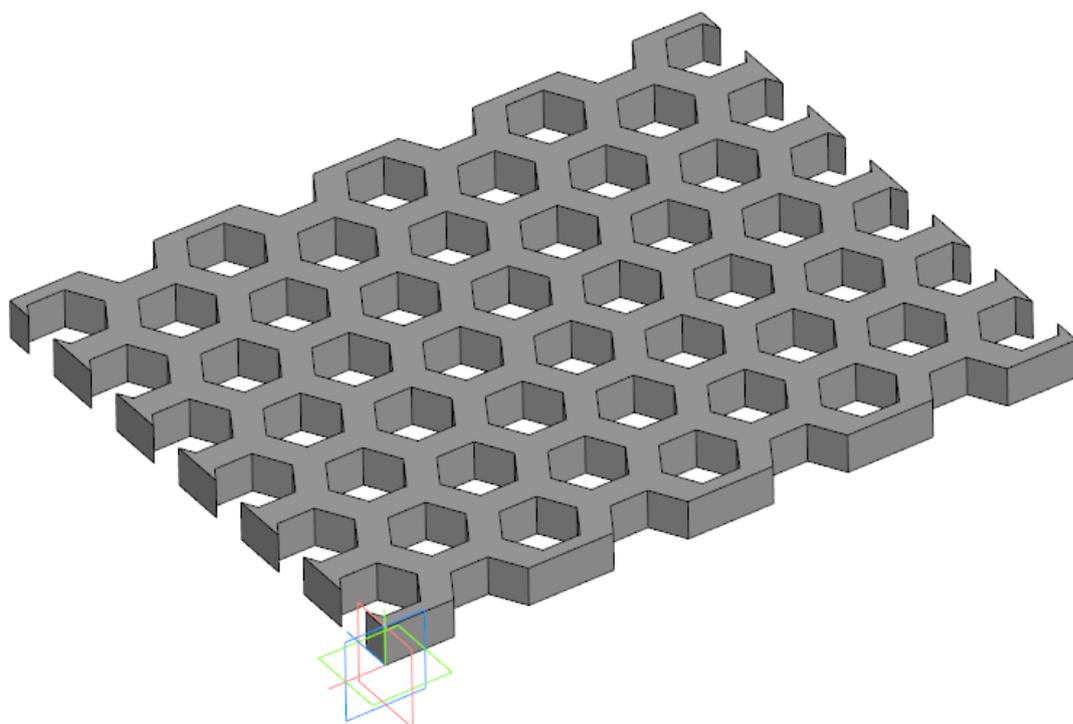


Рисунок 28 – Трёхмерная модель сотового заполнителя

Трёхмерная модель плитки представлена на рисунке 29.

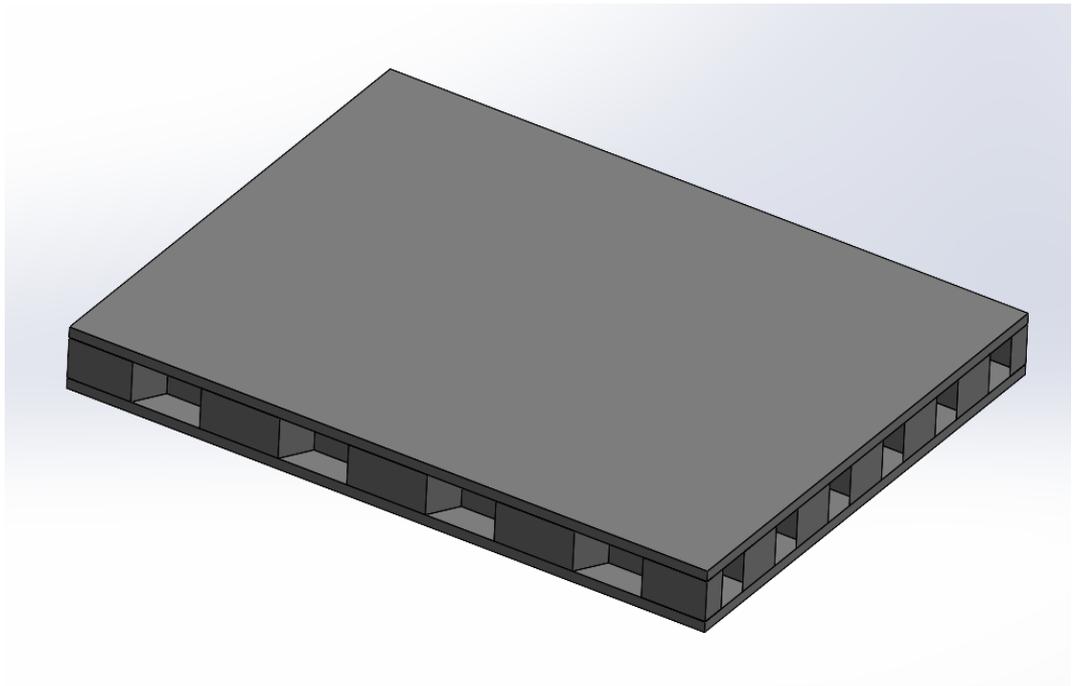


Рисунок 29 – Трёхмерная модель плитки

Трёхмерная модель панели внешней представлена на рисунке 30.

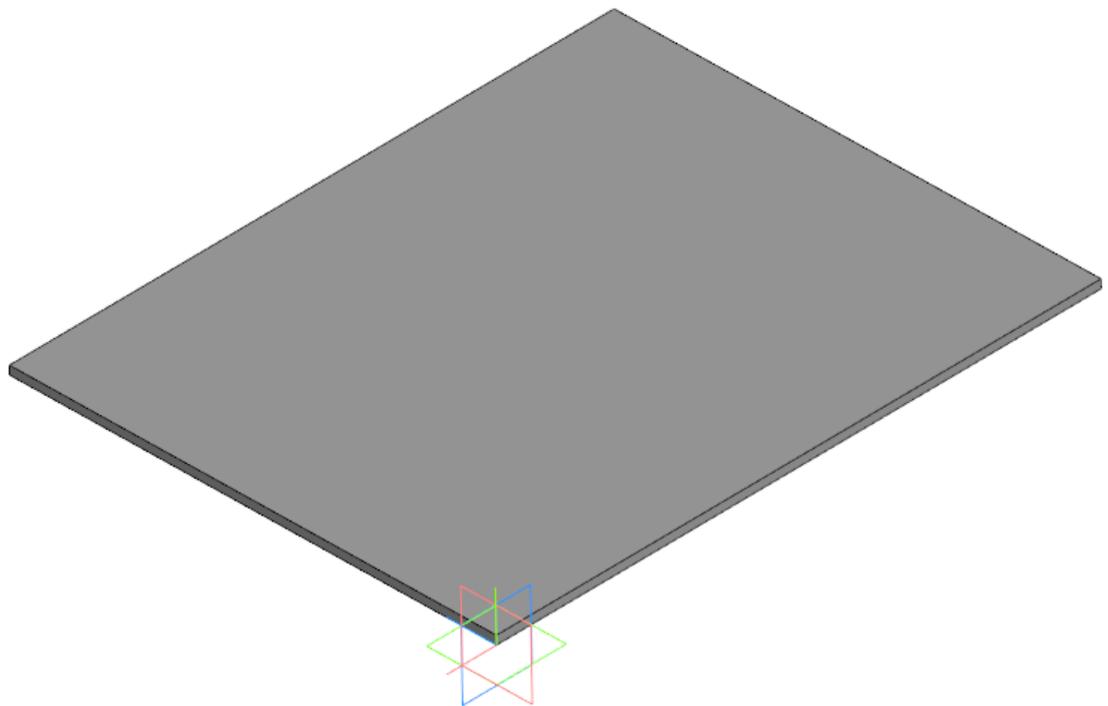


Рисунок 30 – Трёхмерная модель панели внешней

Последовательность и результаты расчётов можно видеть на рисунках 31-

38.

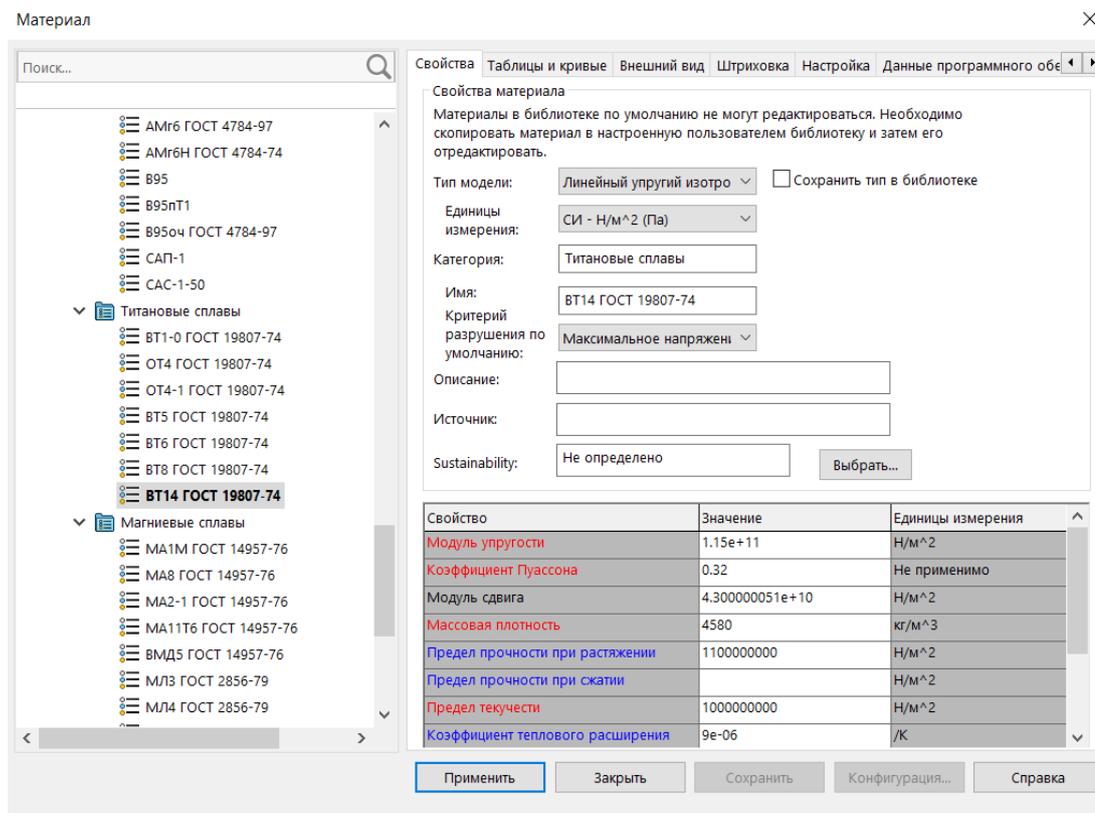


Рисунок 31 – Назначение материала плитки

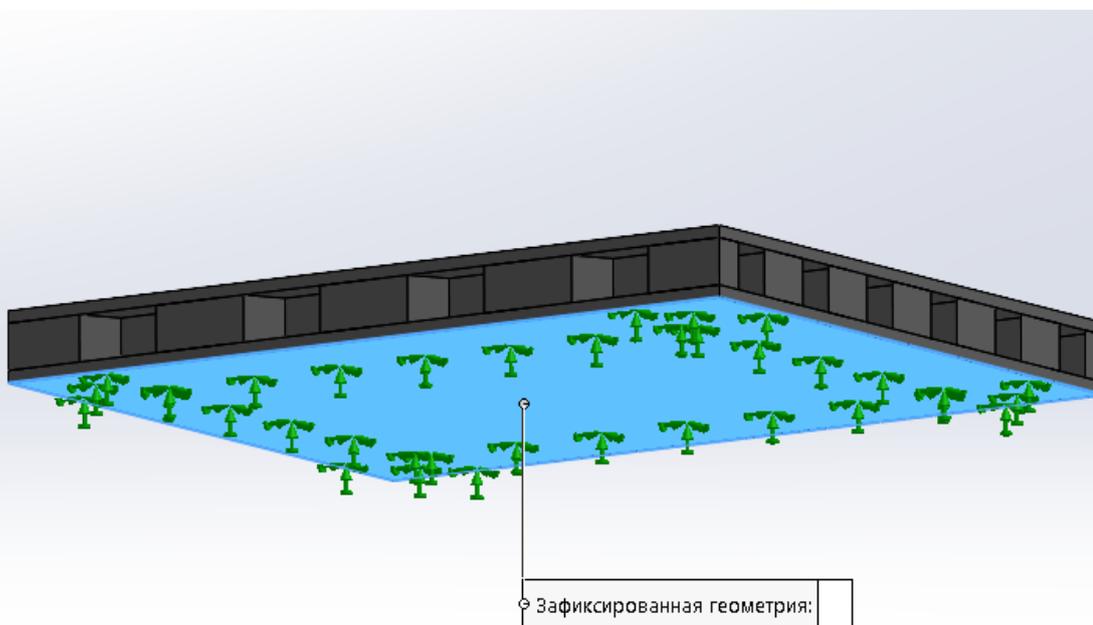


Рисунок 32 – Процесс назначения закреплений

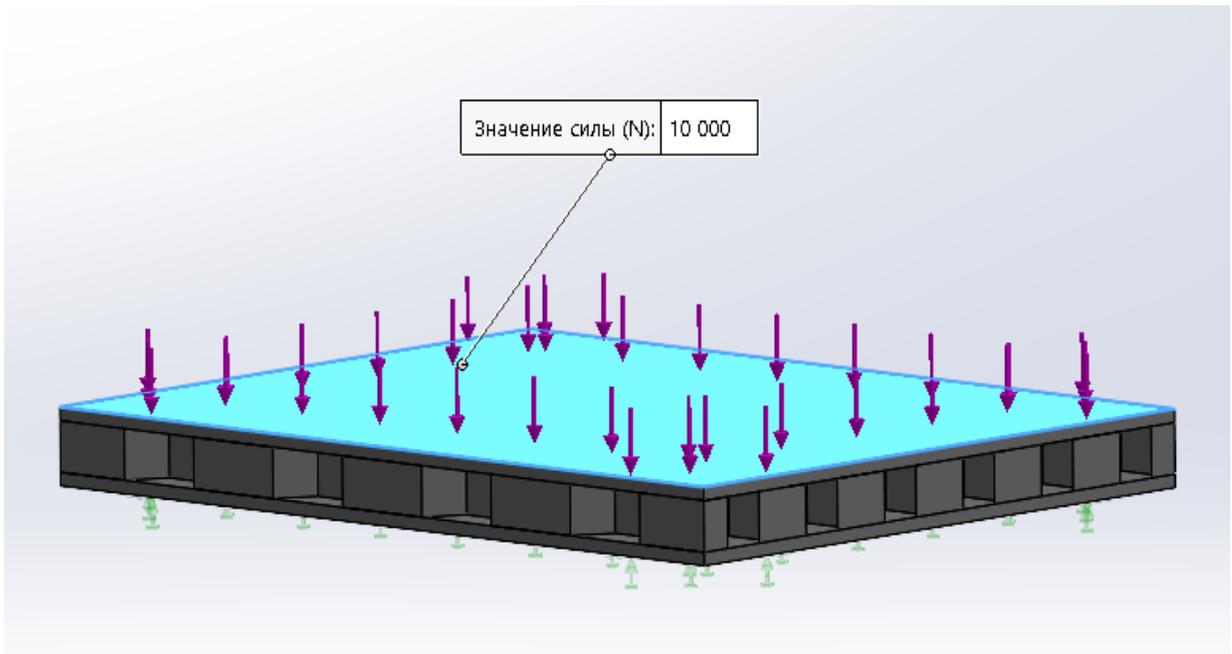


Рисунок 33 – Процесс назначения нагружения.

Расчётная нагрузка соответствует нагрузке от рабочего в снаряжении с десятикратным запасом прочности в обеспечение надёжности.

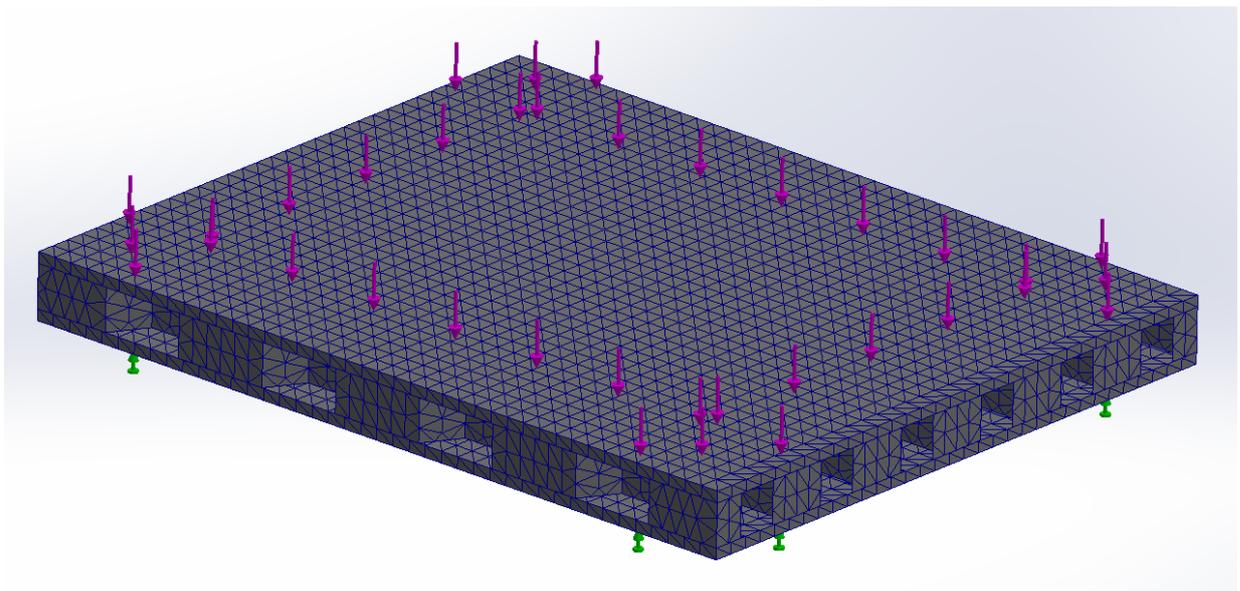


Рисунок 34 – Созданная сетка из тетрагональных конечных элементов

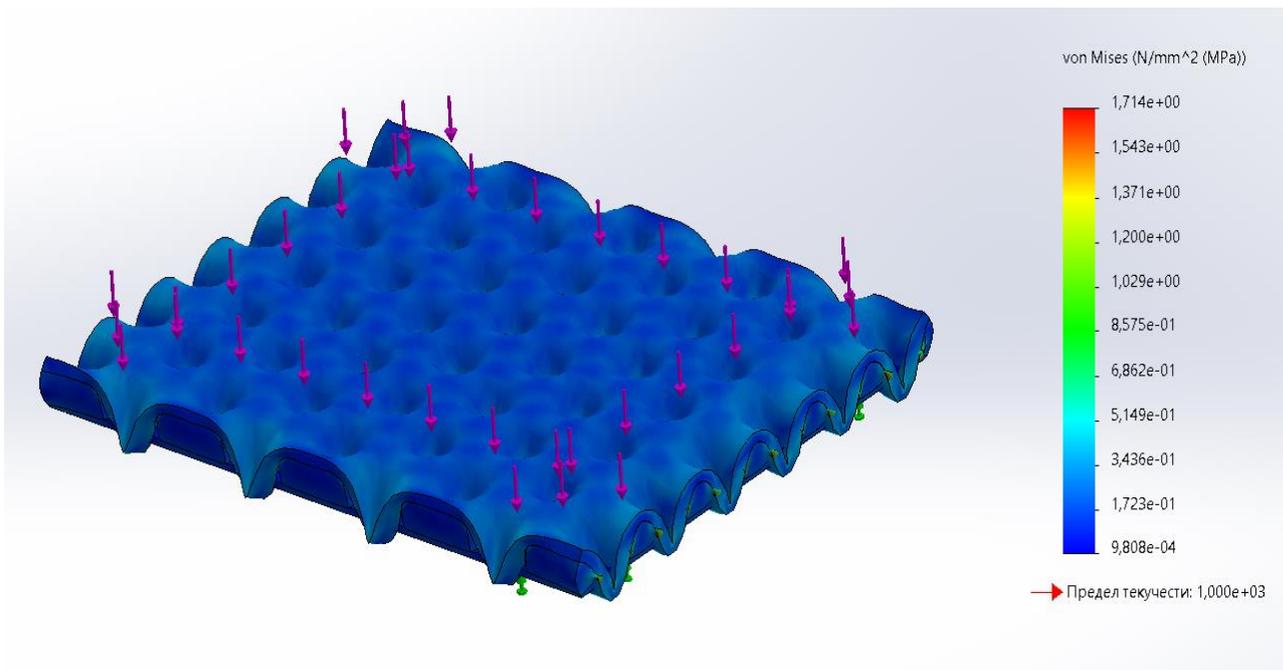


Рисунок 35 – Эпюра эквивалентных напряжений по Мизесу

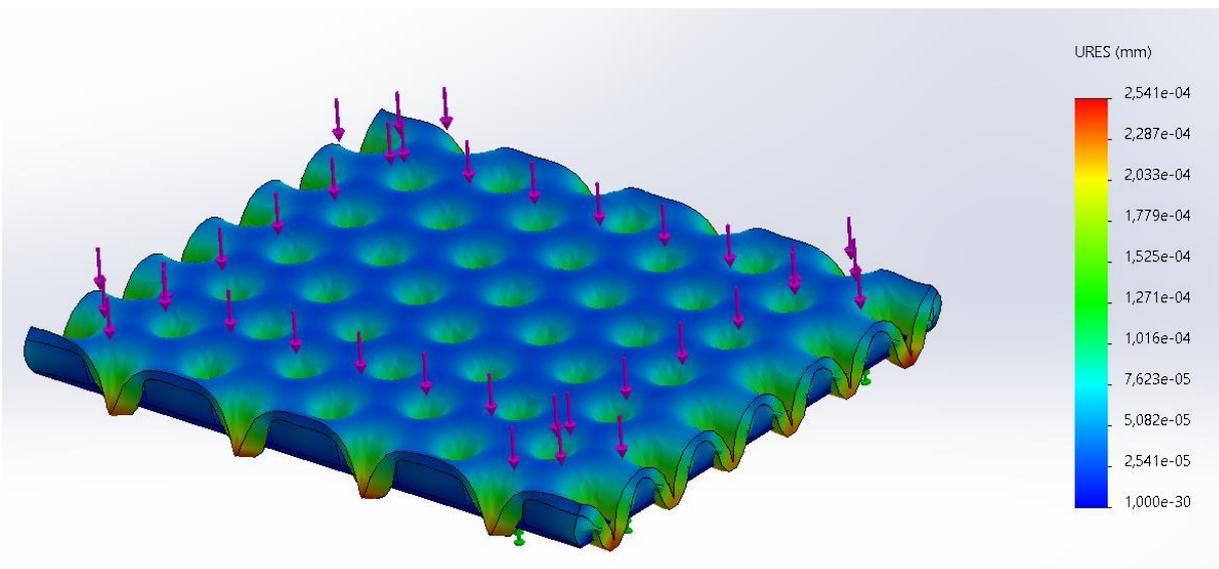


Рисунок 36 – Эпюра статических перемещений

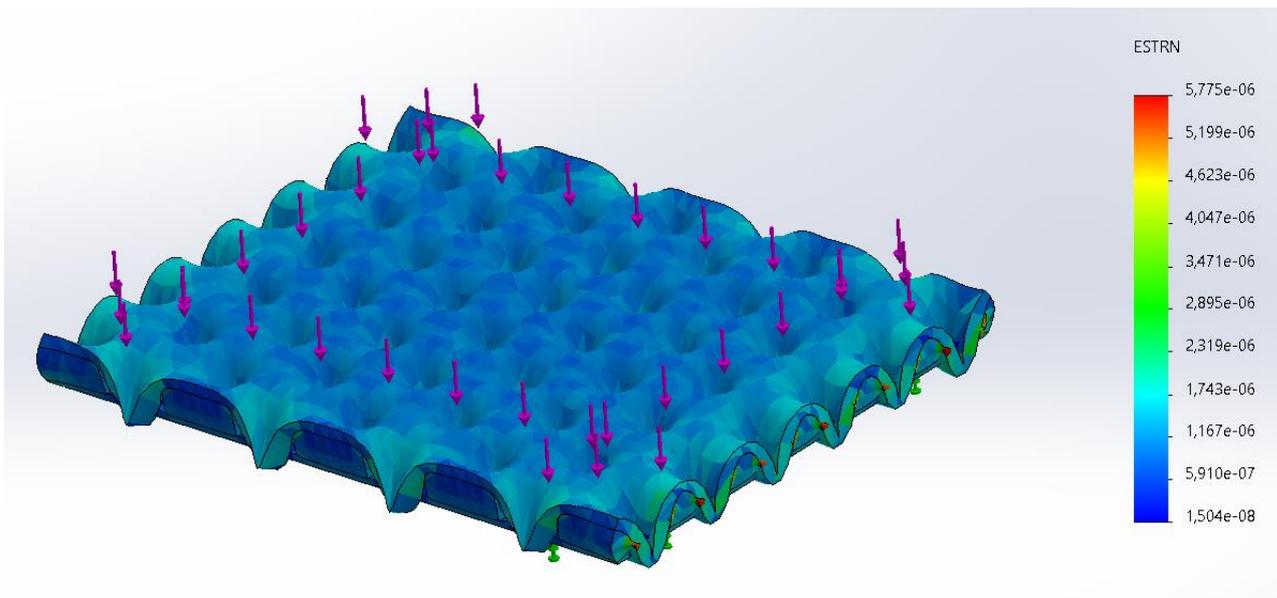


Рисунок 37 – Эпюра статических деформаций

Распределение запаса прочности: Мин. коэффициент запаса прочности = 5,8e+02

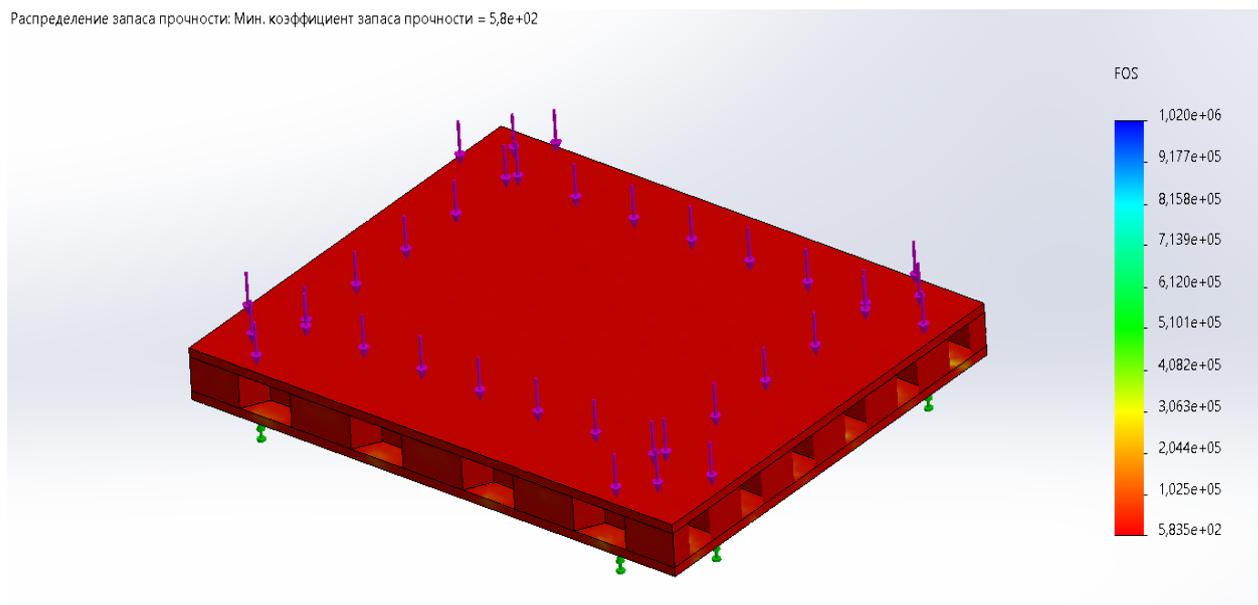


Рисунок 38 – Эпюра запаса прочности

Расчёт показывает, что разработанные плитки выдержат нагрузку и надёжны с точки зрения модели «нагрузка – прочность».

На основании всего изложенного выше, третья глава выпускной квалификационной работы посвящена особенностям разработки производственного процесса изготовления антискользящего покрытия. Были

проанализированы существующие процессы и выдвинуты рекомендации по их усовершенствованию. Представлена краткая характеристика линии для непрерывного производства сотового наполнителя. Составлена схема технологического процесса. Рассмотрены этапы данного технологического процесса и осуществлён выбор основного оборудования. Произведён анализ и озвучены возможности оборудования по процессу создания. Для подтверждения логичности и целесообразности создания подобного покрытия, дополнительно был проведён прочностной расчёт с помощью дополнения Simulation, являющегося составной частью Solidworks.

#### **4.1 Обеспечение безопасных условий труда при работе на стартовом комплексе**

В данной части выпускной квалификационной работы будут рассмотрены вопросы безопасности жизнедеятельности, связанные с работой на стартовом комплексе и изготовлением, а также хранением нескользящего покрытия.

Для обеспечения безопасных условий труда необходимо проанализировать опасные и вредные факторы в ТП, а также выявить воздействие на окружающую среду газообразными, жидкими и твердыми отходами производства, поэтому при проектировании механического цеха по обработке деталей были проанализированы опасные и вредные факторы на всех операциях, входящих в технологию [22].

#### **4.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов**

При проектировании цеха по обработке деталей в соответствии с законодательными требованиями необходимо обеспечить безопасность труда рабочих и специалистов инженерно-технического состава, т.е. учесть все возможные опасные и вредные производственные факторы.

Источники травмоопасных производственных факторов, воздействие которых на работников может привести к травме в процессе обработки деталей, являются следующие:

Режущие инструменты (особенно быстро вращающиеся фрезы, сверла, абразивные круги). Они могут нанести травму, в том числе с тяжелым исходом, при случайном соприкосновении с ними в процессе работы, в случае захвата ими одежды, а также в случаях внезапного их разрушения (разрыв шлифовального или заточного круга, дисковой фрезы, вылет вставных ножей торцовых фрез и т.д.).

Приспособления для закрепления обрабатываемой детали, особенно поводковые и кулачковые патроны; они представляют опасность в случаях захвата одежды выступающими частями в процессе работы станка или случайном попадании руки в опасную зону при не остановленном оборудовании.

Обрабатываемая деталь, особенно быстро вращающиеся заготовки, обрабатываемые на револьверных станках и токарных автоматах.

Приводные и передаточные механизмы станка, особенно ходовые винты и валики токарных и револьверных станков, а также зубчатые передачи, которые могут нанести травму в процессе наладки, смазки и ремонта станка.

Уборка ленточной стружки с рабочего места также небезопасна. Отлетающая стружка, образующаяся при фрезеровании различных материалов, так как могут травмировать глаза [22].

Отлетающие частицы абразива.

Промышленный и осветительный электрический ток.

Тепловые факторы (горячие поверхности обрабатываемых деталей).

Вредными производственными факторами при обработке деталей арматуры, воздействие которых может привести к профессиональному заболеванию, являются:

– пары и газы от смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ). В качестве таких жидкостей широко используют минеральные масла и их эмульсии. Вследствие испарения жидкостей зона дыхания станочников загрязняется аэрозолями СОЖ, загрязняется также их одежда и открытые части тела, кроме местного действия на кожу оказывается также раздражающее действие на слизистые оболочки верхних дыхательных путей;

– повышенный, монотонный шум станков на рабочем месте. Токарно-револьверные станки, револьверные, револьверные с ЧПУ, предназначенные для обработки деталей сложной конфигурации и требующие применения различного режущего инструмента, генерируют шум высокой интенсивности и максимумом звуковой энергии в диапазоне частот от 250 до 4000 Гц. При этом уровни

интенсивности шума некоторых из них превышают допустимый уровень в высокочастотной области спектра;

- несоответствие естественного и искусственного освещения действующим нормам, вызывающие перенапряжение зрения станочника и необходимость чрезмерного приближения его к зоне обработки, что связано с опасностью травмирования;

- пыль с содержанием кристаллической двуокиси кремния от 2,5 до 9,5% является основным неблагоприятным фактором при шлифовке и заточке изделий на искусственных абразивах. Ее источником является керамическая связка. У рабочих, занятых на шлифовальных операциях, сравнительно часто отмечаются бронхиты, катары верхних дыхательных путей и пневмонии;

- ненормативный микроклимат отрицательно влияет на теплообмен организма человека, оказывает существенное влияние на функциональное состояние различных систем организма, самочувствие, работоспособность и здоровье рабочего;

- локальная вибрация, производственными источниками которой являются ручные механизированные машины ударного, ударно-вращательного и вращательного действия с пневматическим или электрическим приводом;

- факторы трудового процесса [22].

#### **4.3 Разработка мероприятий по устранению опасных и вредных производственных факторов при обработке деталей ГТД**

Так как проектируемый цех является механическим, то в нем сосредоточено большое количество металлорежущих станков. В связи с этим существует реальная опасность несчастных случаев, причинами которых могут быть открытые движущиеся части станков, электрокабели, механическая стружка, слабая освещенность, загрязненность воздуха, недостаточная организация труда на участке и на рабочем месте.

Опасные и вредные производственные факторы, воздействие которых в определённых условиях могут привести работающих к травматизму, и мероприятия по их устранению отображены на рисунке 39.

Опасные и вредные факторы	Мероприятия по устранению воздействия опасных и вредных факторов
Открыто движущиеся части оборудования, отлетающие в процессе работы частицы (стружка, абразив и т.п.).	Применение оградительных (кожухи, экраны, шторы, коробки и т. п.) и предохранительных устройств (блокировки обгонные муфты, ограничители хода и т.д.)
Промышленные и осветительные электрические сети.	Применение заземления, релейной защиты или комбинации этих методов, расположение шин на недоступной высоте, заземление.
Излучение электрической дуги.	Специальное оборудование рабочего места, блокирующие устройства, индивидуальные средства защиты.
Разряды статического электричества.	Заземление, установка нейтрализаторов, конструктивные методы снижения электризации.
Наличие повышенного или пониженного давления в агрегатах.	Проведение прочностных расчётов, применение предохранительных устройств, выбор материалов и конструктивных элементов.
Применение тяжёлых предметов (масса более 10 кг).	Применение специальных механизмов.
Тепловые факторы (пар, раскаленные предметы и т.п.)	Применение защитных устройств, автоматических регуляторов, организация рабочего места.
Агрессивные вещества, (травильное отделение)	Применение специальных приспособлений и индивидуальных средств защиты.
Горючие, легко воспламеняемые вещества.	Обоснование выбора данного вещества, установка средств контроля, сигнализации, пожаротушения, вентиляции, защиты от статического электричества.
Разрушение отдельных элементов или всего агрегата при эксплуатации, вылет деталей или режущего инструмента при ненадёжном креплении или раскрытии зажимных элементов приспособления при отключении энергетических ресурсов.	Конструктивные методы, применение защитных приспособлений.
Выделение промышленных ядов, пыли и влаги, тепловое облучение.	Обоснование выбора технологического процесса, вентиляция и кондиционирование воздуха.
Повышенный уровень шума на рабочем месте.	Рациональная планировка оборудования и акустическая обработка помещения, установка кожухов, экранов, кабин.
Повышенный уровень вибраций на рабочем месте.	Виброизоляция, вибропоглощение, виброгашение, выбор режимов резания.
Несоответствие естественного и искусственного освещения действующим нормам.	Применение осветительной установки.

Рисунок 39 – Опасные и вредные факторы и мероприятия по их устранению

#### 4.4 Шум и мероприятия по его снижению

Сильный шум в условиях производства способствует возникновению травматизма, так как на фоне этого шума не слышно сигналов транспорта, автопогрузчиков и других машин [22].

Основными источниками шума в проектируемом цехе являются применяемые металлорежущие станки. Спектр шума металлорежущих станков имеет средне- и высокочастотный характер.

Меры шумобезопасности должны быть указаны в технических условиях на разработанный комплект КМЗ.

#### 4.5 Технологическая вибрация

Производственными источниками локальной вибрации являются возвратно-поступательные движущиеся системы либо неуравновешенные вращающиеся массы. Допустимые нормы вибрации регламентируются СН 2.2.4/2.1.8.566-96. По СН 2.2.4/2.1.8.566-96 в проектируемом цехе устанавливаем вид вибрации по источнику возникновения – общую вибрацию 3 категории – технологическую вибрацию, ее источником являются. Допустимые уровни виброскорости в октавных полосах представим в таблице 3.

Таблица 3 – Допустимые уровни виброскорости в октавных полосах

Вид вибрации	Допустимый уровень виброскорости, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										
	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Общая технологическая: на постоянных рабочих местах проектируемого цеха	-	108	99	93	92	92	92	-	-	-	-
Локальная	-	-	-	115	109	109	109	109	109	109	109

При вынужденной необходимости работы в зоне, где значения вибрации превышают допустимые санитарными нормами значения, длительность контакта с объектами не будет превышать значений, указанных в таблице 4.

Таблица 4 – Допустимая суммарная длительность воздействия вибрации за рабочую смену, мин

Превышение допустимых уровней виброскорости в октавных полосах относительно санитарных норм, дБ	Ручные машины	Рабочие места
0	320	480
До 3	160	120
>6	80	60
>9	40	30
>12	20	15

Для защиты предусмотрено виброзащитное устройство – фундамент для станков и оборудования с неуравновешенными частями выполнен с акустическим разрывом, заполненным пористым материалом, поглощающим вибрации.

#### **4.6 Воздушная среда в планируемом цехе**

В производственных помещениях при работе станков, машин, оборудования, от технологического процесса и нахождения работающих людей выделяются избыточные количества тепла и влаги, а также загрязняющие воздух газы, пары, пыль.

Воздухораспределение рабочей зоны достигается за счет разработки технических процессов, правильной эксплуатации технического оборудования, очистки от загрязнений и подачи чистого воздуха в рабочую зону с помощью вентиляции [22].

Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений регламентируются СанПиН 2.2.4.548-96.

Для проектируемого помещения санитарные показатели представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Показатели микроклимата проектируемого помещения

Показатели	Размерность	Численные значения норматива
Категория работ: Пб-средней тяжести		
1	2	3
Допустимая температура: – в холодный период года – в теплый период года	С <sup>0</sup>	15-22 16-27
1	2	3
Допустимая относительная влажность: – в холодный период года – в теплый период года	%	15-75 15-75
Допустимая скорость движения воздуха: – в холодный период года – в теплый период года	м/с	≤0,4 ≤0,5
ПДК абразивной пыли	мг/м <sup>3</sup>	4
СОЖ		3

В проектируемом механическом цехе процессы обточки, шлифовки, полировки сопровождаются пылевыведением, интенсивность которого зависит от вида обрабатываемого металла, используемого инструмента. При обработке металлов используются токарные, фрезерные, сверлильные, точильные,

шлифовальные, полировальные и другие станки, при работе которых применяются смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ).

В результате механического разбрызгивания и испарения СОЖ, так как температура режущего инструмента, орошаемого СОЖ, может достигать нескольких сот градусов, ее компоненты поступают в воздух в виде масляных и иных аэрозолей, а также сложных парогазовых смесей.

Его вдыхание может оказывать раздражающее действие на органы дыхания, легочную ткань, а также неблагоприятное воздействие на другие системы организма. Соответственно, обеспечивается наличие местных выхлопных устройств в местах, где выделяется пыль и пары, общая вентиляция выхлопных газов, а также естественная вентиляция.

В планируемом помещении проводим приточно-вытяжную вентиляцию. В этой системе воздух подается в помещение с впускной вентиляцией и удаляется вытяжной вентиляцией, которая работает одновременно.

Применяем следующую меру для экономии тепла, расходуемого на нагрев воздуха в холодное время года: осуществляем приточно-вытяжную вентиляцию с рециркуляцией. Он характеризуется тем, что воздух, всасываемый выхлопной системой из помещения, частично повторно вводится в это помещение через систему впуска, соединенную с выхлопной системой.

Местная вентиляция будет установлена над каждой машиной и объединена в свою специальную систему вентиляции, чтобы предотвратить попадание пыли в общую вентиляцию, воздух очищается специальным фильтром, который разрушается по истечении срока службы.

Произведение часа воздухообмена, то есть почасового объема воздушного потока через помещение, деленного на объем помещения, составляет 2,5 (1 / ч).

Таким образом, объем воздушного потока в час составляет 7054 (м<sup>3</sup>/ч).

В здании цеха делают три ряда проемов со створками (рис.39).изображение).

Летом отверстия открываются 1 и 3. Свежий воздух поступает в помещение через 1. Нижние отверстия располагаются на небольшой высоте от пола (1-1,5 м) и удаляются через отверстия 3 в помещении [22].

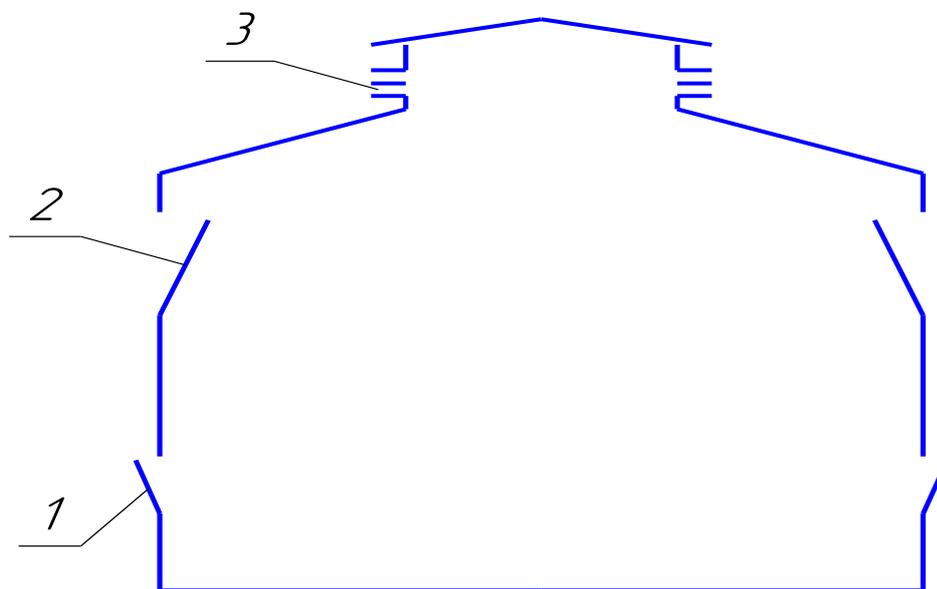


Рисунок 40 – Схема аэрации здания

Поступление наружного воздуха в зимнее время осуществляется через проемы 2, расположенные на высоте 4 – 7 м от пола. Высота принимается с таким расчетом, чтобы холодный наружный воздух, опускаясь до рабочей зоны, успел достаточно нагреться за счет перемешивания с теплым воздухом помещения.

Изменение положения створок производится электрическим приводом, таким образом, регулируется воздухообмен [22].

#### **4.7 Пожарная безопасность**

Для предупреждения возникновения пожаров и ограничения их размеров существует пожарная профилактика, в которую входят следующие мероприятия.

1) Мероприятия, что могут устранить непосредственные или возможные причины пожаров. К ним можно отнести: изучение процессов производства с точки зрения пожарной безопасности, а также установка возможных источников возникновения пламени, появление искр, и каких-либо разрядов статического электричества.

Пожароопасные технологические операции заменены менее опасными, а также уменьшено количество горючих и взрывоопасных веществ в помещениях.

2) Мероприятия, ограничивающие распространение возникшего пожара. Они заключаются в применении огнестойких строительных конструкций, устройств противопожарных преград.

Для локализации пожара в производственном помещении используются водяные завесы; автоматы, перекрывающие газопроводы при взрыве; автоматические заслонки в каналах вентиляции.

3) Мероприятия, что могут обеспечить полноценную и успешную эвакуацию людей, а также их имущества из горящего здания. Абсолютно любое помещение имеет в наличии план эвакуации. Коридоры имеют ширину не менее 0,6 м на 100 человек, а ширина коридоров в цехе составляет 2 м. Двери открываются по направлению к выходу из здания.

4) Мероприятия, обеспечивающие успешное развертывание действий по тушению пожара. К ним относятся: устройство удобных подъездов к зданиям, наружных лестниц; сооружение стационарных огнетушительных стенок, внутренних пожарных кранов, пожарной сигнализации.

Степень огнестойкости здания определяется огнестойкостью его конструкции в соответствии с СНиП 21-01-97.

В зданиях и постройках всех степеней огнестойкости противопожарные стены (брандмауэры), которые разделяют помещения на отдельные отсеки, делаются несгораемыми, с пределом огнестойкости = 4 часам. С помощью брандмауэров отделяются конторские и бытовые помещения от цеха [22].

Пожарная профилактика в проектируемом механическом цехе включает:

Облицовку металлическими щитами стен и пола;

Организация мест для курения;

Противопожарные преграды (железные двери, ворота, перегородки);

Широкие проходы (>2м) для эвакуации, а также лестницы и выходы.

Средства для локализации и тушения пожара:

Установка в цехе пожарной сигнализации (комбинированный извещатель пожара автоматического действия) отделения пожарной команды;

Порошковый огнетушитель ОП-10(3), применяемый для тушения загорания твердых материалов на площади до 2 м<sup>2</sup>;

Данные по обеспечению пожарной безопасности производственного помещения сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Показатели пожарной характеристики производственного помещения

№ п/п	Наименование показателей и оборудования	Показатель и количество
1	Категория производства по степени пожарной опасности	В
2	Класс пожара горючих веществ и материалов	А, В, (Е)
3	Наименьшая суммарная ширина проходов для эвакуации	2 м
4	Число пожарных кранов 15БЗР (периметр цеха 232м)	5 шт. (на 50п.м. – 1шт)
5	Число пожарных постов	1 шт. (на 5000 м <sup>2</sup> – 1 шт.)
6	Количество огнетушителей в цехе ОП-10	2 шт. (на 400 м <sup>2</sup> – 1 шт)
7	Хладоновые огнетушители вместимостью 2 л	4 шт. (на 400м <sup>2</sup> – 2 шт)

Применение автоматических средств обнаружения пожаров является одним из основных условий обеспечения пожарной безопасности, так как позволяет оповестить дежурный персонал о пожаре и месте его возникновения.

Оповещение и управление эвакуацией людей при пожаре осуществляется следующими способами: подачей звуковых (сирена) и световых (световые мигающие указатели, световые оповещатели "Выход", статические указатели направления движения) сигналов во все помещения здания с постоянным или временным пребыванием людей.

Эвакуационные световые указатели включаются одновременно с основными осветительными приборами рабочего освещения.

Звуковые сигналы обеспечивают общий уровень звука. Уровень звука постоянного шума вместе со всеми сигналами, производимыми оповещателями, не менее 75 децибел на расстоянии 3 м от оповещателя, но не превышает 120 дБА в любой точке защищаемого помещения.

Для обеспечения четкой слышимости звуковые сигналы система оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ) должны обеспечивать уровень звука не менее чем на 15 децибел выше допустимого уровня звука постоянного шума в защищаемом помещении.

Настенные звуковые оповещатели крепятся на высоте не менее 2,3 метра от уровня пола, но расстояние от потолка до оповещателя не менее 150 мм.

Размещение пожарного инвентаря производится так, чтобы был свободный доступ к нему в любое время, и чтобы он не был отрезан в случае пожара.

Пожарный инвентарь подвешивается на расстоянии до 1,5 м от пола, краны и рукава на высоте 1,35 метров от пола. Краны помещаются в специальные шкафы, окрашенные в красный цвет.

## 5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРАБОТАННОГО ПОКРЫТИЯ

Для обоснования экономической эффективности разработанного изделия необходимо сравнить его характеристики с характеристиками эксплуатирующихся изделий. Поскольку точный учёт всех факторов является многокритериальной задачей математического программирования, в выпускной квалификационной работе используется упрощённый расчёт с использованием метода построения секторограмм и метода взвешенной оценки показателя качества.

В рамках анализа рассматривается три вида покрытия стартового стола. Имеем:

I вариант – КМЗ стартового стола космодрома Танегасима (Япония).

II вариант – КМЗ стартового стола космодрома Восточный (РФ).

III станок – разрабатываемый КМЗ стартового стола космодрома Восточный (РФ).

В качестве показателей качества будем опираться на 6 показателей:

- стоимость разработки (чем ниже, тем лучше);
- масса (чем ниже, тем лучше);
- антискользкие свойства (чем выше, тем лучше);
- теплостойкость (чем больше, тем лучше);
- рентабельность производства (чем больше, тем лучше);
- степень внедрения инновационных технологий (чем больше, тем лучше).

### 5.1 Метод построения секторограмм

Составим таблицу показателей (таблица 7). Примечание: все показатели даны в условных единицах на основании экспертной оценки по результатам обработки технической документации.

Таблица 7 – Сравнение основных показателей

	Стоимость разработки (1)		Масса (2)		Антискользящие свойства (3)		Теплостойкость (4)		Рентабельность пр-ва (5)		Степень внедрения инн. техн. (6)	
	млн у.е.		т		баллы		баллы		баллы		баллы	
I	563 84	100 %	40	100 %	15 0	20%	3480 0	53,5 %	10	62,5%	4 5	100 %
II	162 248	34,8 %	127	31,5 %	75 0	100%	6500 0	100 %	13	81,3%	3 5	78%
III	632 00	89,2 %	62	64,5 %	55 0	73%	5152 0	79,3 %	16	100%	4 5	100 %

На основании представленных в таблице 9 результатов сравнения выполним построение секторограммы на рисунке 40.

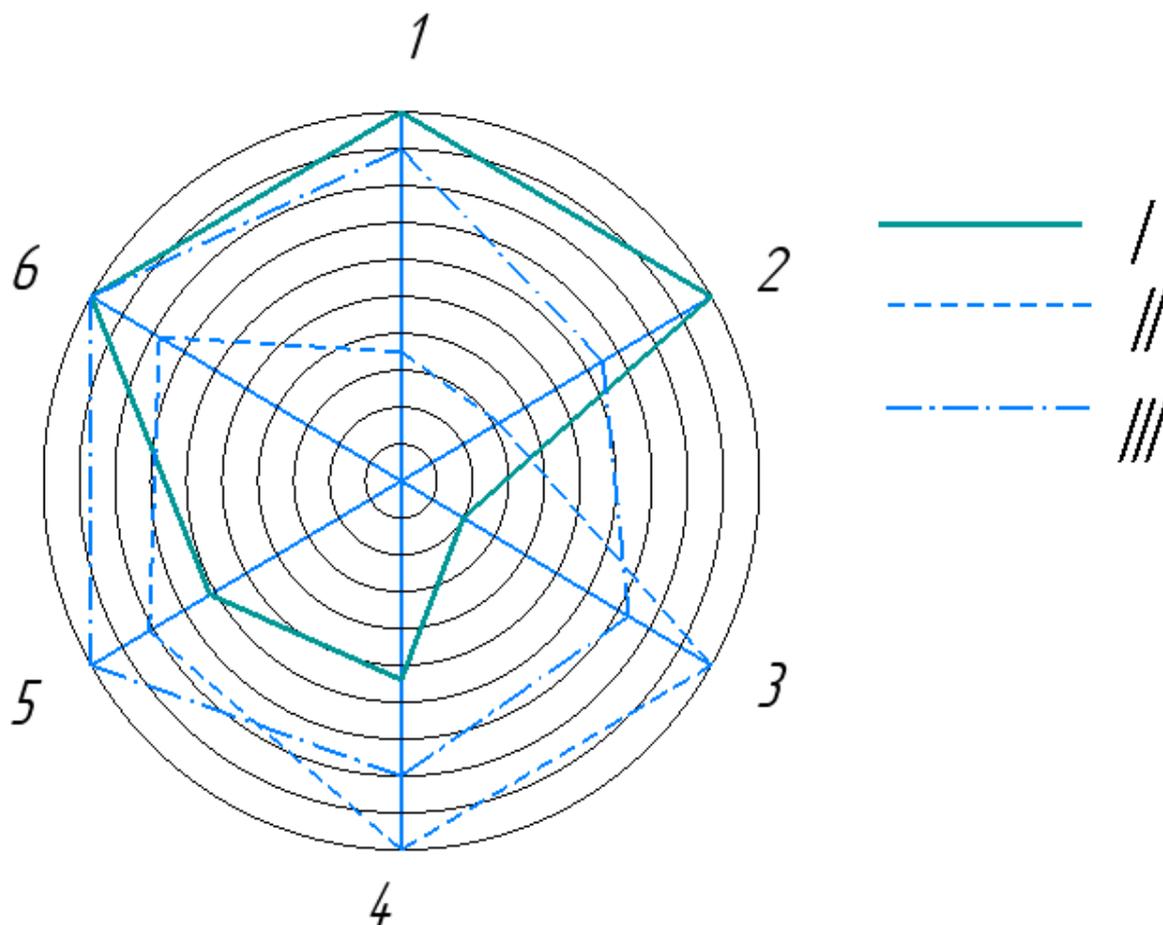


Рисунок 41 – Секторограммы

Вычислим площади получившихся фигур при помощи ПО Компас-3D (рисунок 41).



Рисунок 42 – Расчёт площадей секторограмм

На основании анализа площадей секторограмм видно, что лучшим вариантом из данных трёх является III вариант (разрабатываемый КМЗ).

Вычислим научно-технический уровень оставшихся двух:

$$HTY_I = S_I / S_{III} = 9252,25 / 12345,4 = 0,7488; \quad (1)$$

$$HTY_{II} = S_{II} / S_{III} = 8936,34 / 12356,4 = 0,7232. \quad (2)$$

Как показывают результаты, I вариант хуже III, но лучше II. Таким образом, наиболее низкий научно-технический уровень имеет II вариант КМЗ.

## 5.2 Метод взвешенной оценки показателей качества

Выполним анализ в соответствии с методом взвешенной оценки показателей качества и представим результаты в таблице на рисунке 42.

№	Показатель качества	Классиф. группа	Размерность	Величина показателей по сравниваемым вариантам						Удельные веса						Сумма	Взвешенная оценка		
				В натуральных единицах			В относительных единицах (%)			Номера показателей							I	II	III
				1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6				
1	Цена	экономическая	руб	56384	163248	63200	100,00	34,54	89,22		1	0,6	0,8	1	1	4,4	440,00	151,97	392,55
2	Масса	Эксплуатационная	кг	40	127	62	100,00	31,50	64,52	0,8		0,8	0,6	1	1	4,2	420,00	132,28	270,97
3	Мощность	Производительность	Вт	150	750	550	20,00	100,00	73,33	1	1		0,9	1	1	4,9	98,00	490,00	359,33
4	Площадь стола	Эксплуатационная	кв. мм	34800	65000	51520	53,54	100,00	79,26	1	1	1		1	0,9	4,9	262,34	490,00	388,38
5	D сверла	Производительность	мм	10	13	16	62,50	81,25	100,00	0,4	0,7	0,4	0,9		0,8	3,2	200,00	260,00	320,00
6	Угол наклона	Производительность	град	45	35	45	100,00	77,78	100,00	0,7	0,6	0,5	1	1		3,8	380,00	295,56	380,00
Сумма																1800,34	1819,81	2111,23	

Рисунок 43 – Таблица метода взвешенной оценки показателей качества

Оценка данным методом показала, что наилучшим вариантом, как и в предыдущем методе, оказался III вариант КМЗ, однако II вариант, наоборот, оказался лучше, чем I.

$$НТУ_I = 1800,34 / 2111,23 = 0,8527;$$

$$НТУ_{II} = 1819,81 / 2111,23 = 0,8620.$$

На основании результатов сравнения экономической эффективности двумя методами можно сделать вывод, что разработанный КМЗ обеспечивает должную экономическую эффективность и может быть использован в эксплуатационных реалиях космодрома.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам первой главы выпускной квалификационной работы, посвящённой теоретическим основам функционирования комплекта металлозащиты стартового стола, рассмотрены основные элементы ракетно-космического комплекса и изучено устройство комплекта металлозащиты перекрытия блока «Б» на космодроме Восточный. Было выявлено, что в настоящее время использование существующего комплекта металлозащиты связано с рядом проблем. Прежде всего, конструкция, выполненная из металла, в климатических условиях Дальнего Востока не обеспечивает должной температурной защиты, в связи с чем работать в морозное время весьма затруднительно. Ещё одним недостатком эксплуатирующейся системы выступает значительное число сварочных операций, которые могут потребоваться при сборке комплекта металлозащиты или выполнении ремонтно-эксплуатационных мероприятий. В связи с вышеперечисленным, в рамках данной выпускной квалификационной работы рассматривается возможность модернизации комплекта металлозащиты путём его замены на более перспективный, представляющий собой набор панелей сотовой конструкции. Разрабатываемый комплект адаптирован к климатическим условиям Дальнего Востока, может эксплуатироваться при значительных перепадах температур резко-континентального климата, при обеспечении несскользящих свойств с целью повышения безопасности работы персонала.

По результатам второй главы ВКР был выбран прототип сотовой конструкции, которым выступает комплект тепловой защиты на американских кораблях X-33 и «Венчурстар», поскольку данная конструкция позволяет выдержать статические нагрузки, обеспечить несскользящие свойства, а также обеспечить необходимую теплозащиту в условиях Дальнего Востока. В качестве материала выбран сотовый наполнитель выбран сплав ВТ-15. В качестве клея для изготовления конструкции выбирается ВК-31. Из рассмотренных типов конфигурации сотового наполнителя принято решение использовать

заполнитель шестигранного профиля, располагаемый в шахматном порядке, так как он позволяет обеспечить необходимые прочностные характеристики. С помощью численного решения уравнений методом Рунге-Кутты IV порядка был произведён предварительный прочностной расчёт плитки, который показал, что конструкция выдержит прилагаемые нагрузки в наихудших температурных условиях. Также был выбран метод изготовления сотовой конструкции (метод склеивания), рассмотрены особенности сборки конструкции и методы контроля качества.

Третья глава выпускной квалификационной работы посвящена особенностям разработки производственного процесса изготовления антискользящего покрытия. Были проанализированы существующие процессы и выдвинуты рекомендации по их усовершенствованию. Представлена краткая характеристика линии для непрерывного производства сотового заполнителя. Составлена схема технологического процесса. Озвучены основные варианты оборудования для создания выбранной модели сотовой панели. Дополнительно проведён расчёт на прочности при помощи Solidworks и получены хорошие показатели по нагрузке плитки.

В рамках четвёртой главы выпускной квалификационной работы были проанализированы основные опасные и вредные производственные факторы, которые могут возникать в производственном процессе. Разработаны мероприятия, приведены основные нормативные документы, в соответствии с которыми должен производиться учёт указанных факторов для обеспечения безопасности жизнедеятельности.

В пятой главе была произведена экономическая оценка эффективности использования разрабатываемого КМЗ. Оценка проводилась двумя методами: методом построения секторограмм и методом взвешенной оценки показателей качества. Показано, что с экономической точки зрения разрабатываемый КМЗ является эффективным.

По результатам выполнения выпускной квалификационной работы можно сделать вывод о том, что цель достигнута, задачи выполнены в полном объёме.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Инженерный справочник по космической технике [Текст] / редколлегия: И. И. Караваев, А. А. Кудряшов, А. П. Лимаренко [и др.]; под общ. ред. А. В. Солодова. - М.: Министерство обороны, 1969. –693 с.
- 2 Фертрегт, М. Основы космонавтики [Текст]. / М.Фертрегт; пер. с англ. А.Н. Рубашова; под ред. А.А. Космодемьянского. - М.: Просвещение. 1969. - 302 с.
- 3 Проектирование и испытания баллистических ракет [Текст] / под ред. В.И. Варфоломеева и М.И. Копытова. - М.: Воениздат, 1970. – 302 с.
- 4 Дракин, И. И. Основы проектирования беспилотных ЛА с учетом экономической эффективности [Текст] / И. И. Дракин. - М.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
- 5 Феодосьев, В. В. Основы техники ракетного полета [Текст]. / В.В.Феодосьев. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 496 с.
- 6 Альбом основных характеристик зарубежных ракет-носителей и баллистических ракет [Текст] / сост. доц. В. М. Белоконов. – Куйбышев: КуАИ, 1979. - 82 с.
- 7 Мишин, В.П. Основы проектирования летательных аппаратов (транспортные системы) [Текст]: Учебник для технических вузов /В. П. Мишин, В. К. Безвербый, Б.М. Панкратов [и др.]; под ред. В. П. Мишина. – М.: Машиностроение, 1985. - 360 с.
- 8 Конструкция и проектирование космических летательных аппаратов [Текст]: Учебник. / [Н.И. Паничкин и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. - 344 с.
- 9 Основы строительной механики ракет [Текст] / Л. И. Балабух, К. С. Колесников, В. С. Зарубин [и др.] - М.: Высш. шк., 1989. – 496 с.
- 10 Гофин, М.Я. Механика сотовых конструкций [Текст] : справочник : в 2 т. / М.Я. Гофин, А. А. Иванов. - Москва : Мир, 2012-.Т. 2: Теоретическая

механика сотовых конструкций. Т. 2. - 2012. - 320 с. : ил., портр.; ISBN 978-5-91158-024-7 (в пер.)

11 Тихонов, Н. Н. Оборудование и инструменты заводов пластмасс в подготовительных процессах : учебное пособие для среднего профессионального образования / Н. Н. Тихонов, М. А. Шерышев. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 302 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-10577-3.

12 Тихонов, Н. Н. Оборудование и инструменты заводов пластмасс: периферийное оборудование : учебное пособие для среднего профессионального образования / Н. Н. Тихонов, М. А. Шерышев. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2019. — 292 с. — (Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-10574-2.

13 Носов, В.В. Механика композиционных материалов. Лабораторные работы и практические занятия Серия: "Учебники для вузов. Специальная литература". Издательство: Лань - ISBN: 978-5-8114-1446-3.

14 Кербер, М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. 5-е исправленное и дополненное издание - СПб.: ЦОП Профессия. 2018. 640 стр. ISBN: 978-5-91844-103-0.

15 Перепелкин, К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты - СПб.: ЦОП Профессия. 2015. 380 стр. ISBN: 978-5-91703-009-8.

16 Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. - СПб.: ЦОП Профессия. 2015. 822 стр. ISBN: 978-5-91703-003-6.

17 Крайнов, М. С. Экономика производств по переработке пластмасс. Техничко-экономический анализ и калькулирование себестоимости продукции практическое руководство - СПб.: ЦОП Профессия. 2018. 288 с. ISBN: 978-5-91884-102-0.

18 Марк Ф. Зонненшайн Полиуретаны. Состав, свойства, производство, применение - СПб.: ЦОП Профессия. 2018. 576 с. ISBN: 978-5-91844-095-5.

19 Шерышев, М.А., Организация и проектирование предприятий переработки пластмасс 2 издание - СПб.: ЦОП Профессия. 2018. 384 с. ISBN: 978-5-91844-063-4.

20 Кобелев, А. Материаловедение. Технология композиционных материалов. Учебник для бакалавров - СПб.: ЦОП Профессия. 2016. 270 с. ISBN: 9785406048146.

21 Головкин, Г.С., Научные основы производства изделий из термопластичных композиционных материалов. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. — 471 с.

22 Белов, С.В. Безопасность жизнедеятельности [Текст]: учебник для вузов / С.В. Белов, А.В. Ильницкая, А.Ф. Козьяков и др. — М.: Высшая школа, 2005. — 606 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

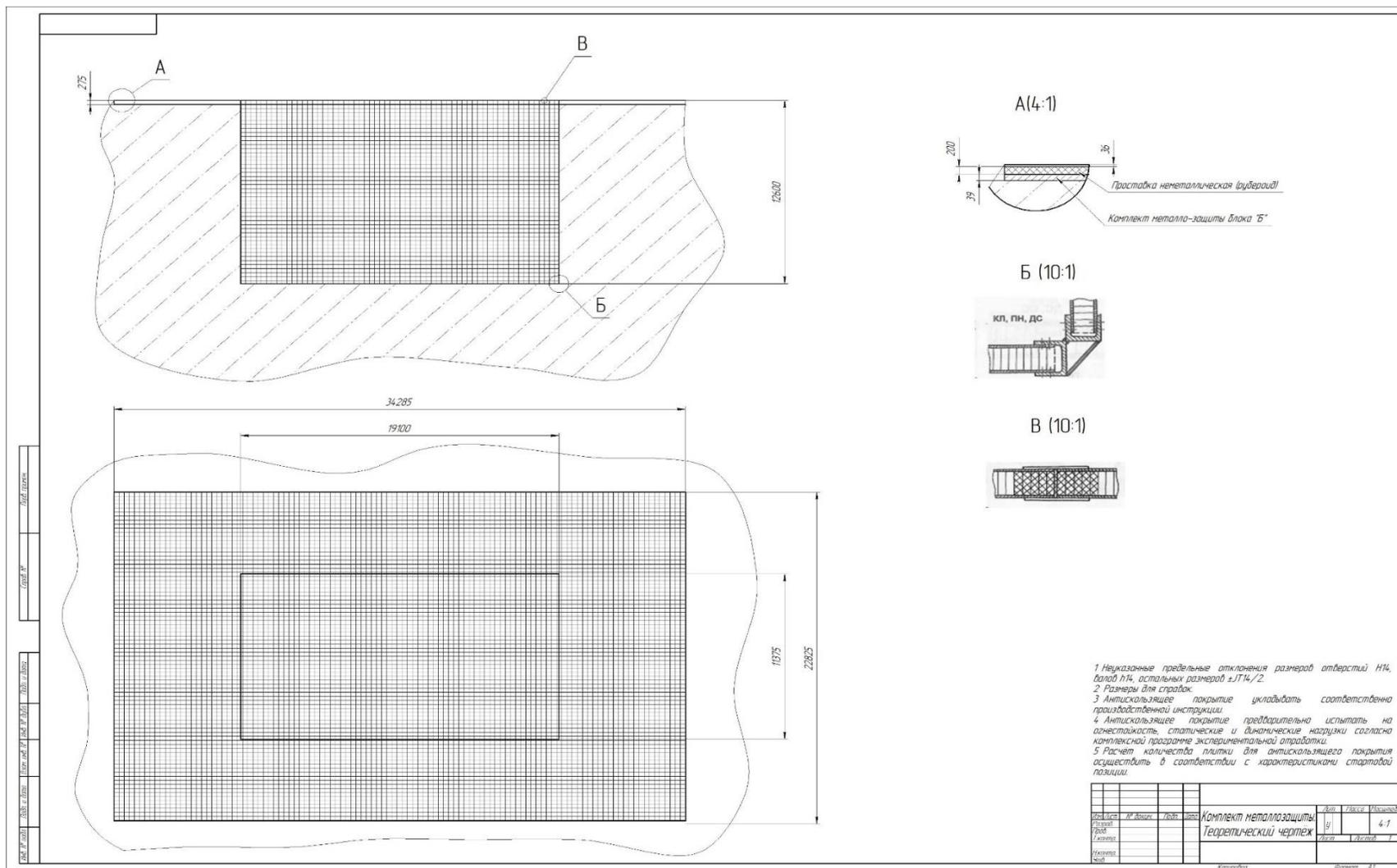


Рисунок А.1 – Комплект металло-защиты. Теоретический чертёж

# Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

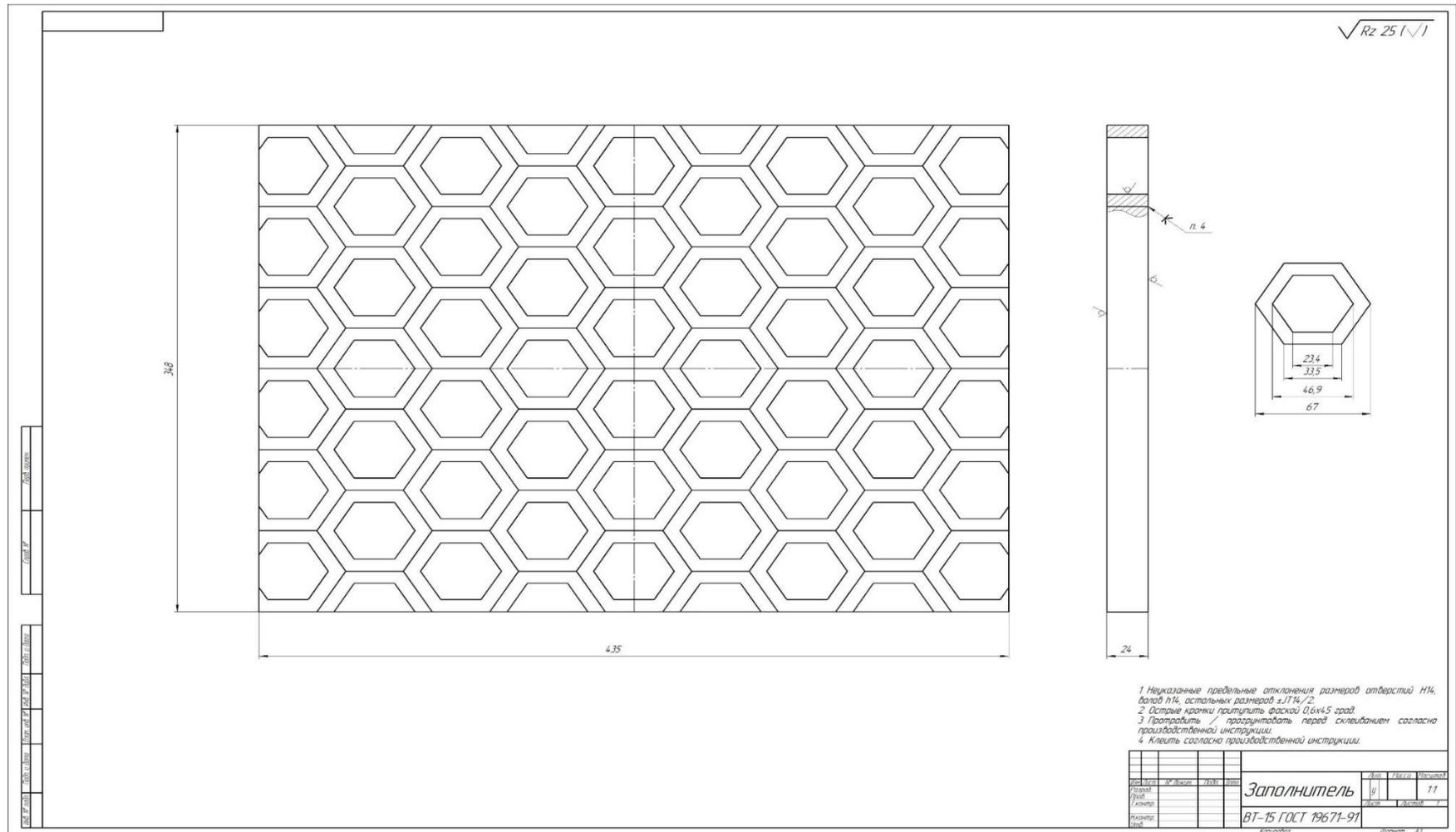


Рисунок А.2 – Чертёж заполнителя

# Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

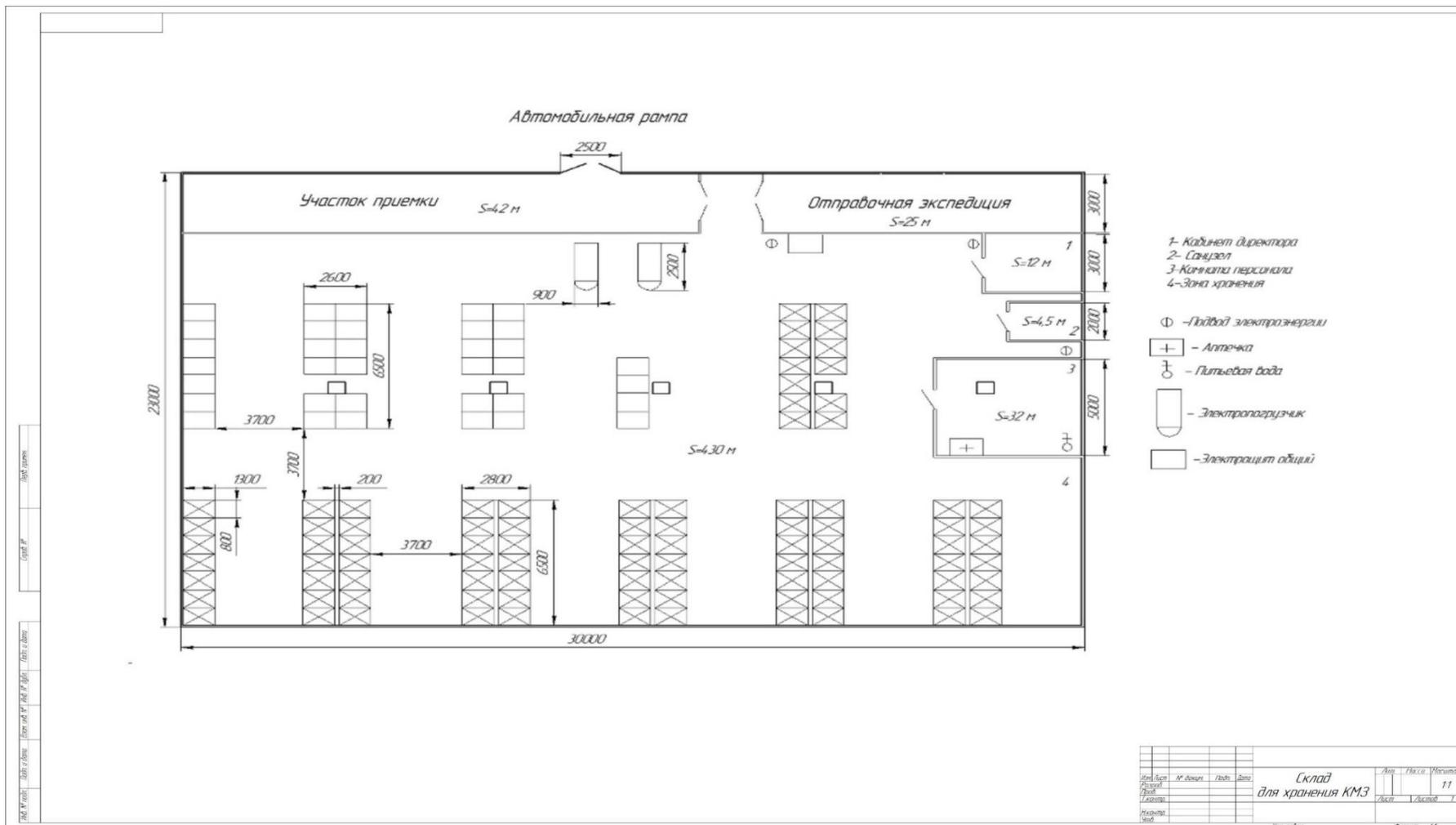


Рисунок А.3 – Схема склада для хранения КМЗ

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

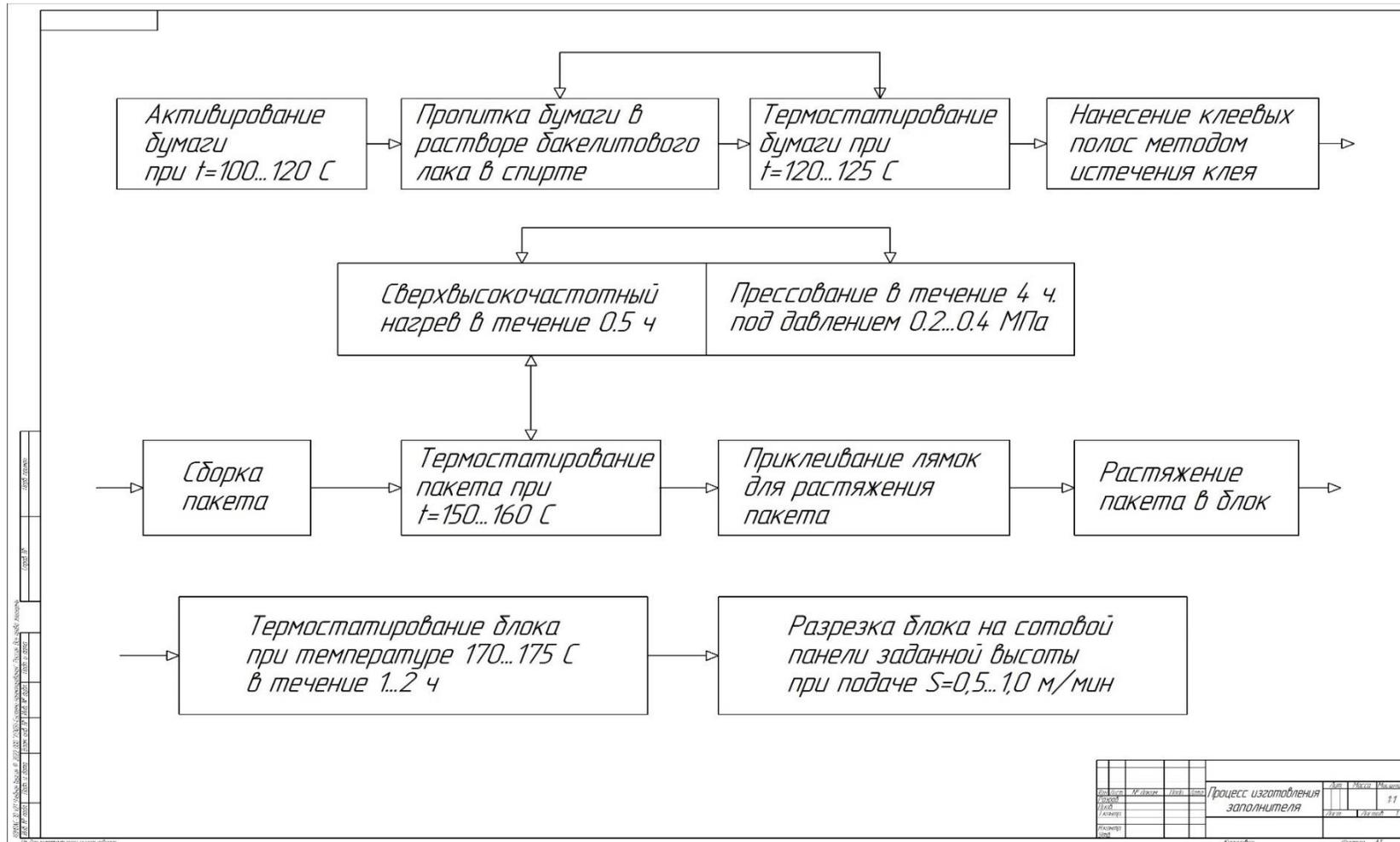


Рисунок А.4 – Процесс изготовления заполнителя