

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

Факультет: Инженерно-Физический

Кафедра: Стартовые и технические ракетные комплексы

Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика

Направленность (профиль) образовательной программы – Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зам. зав. кафедрой


 В. В. Соловьев

« 15 » июня 2021 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Разработка имитатора транспортно-пускового контейнера спутников формата CubeSat для проведения вибродинамических испытаний

Исполнитель  
студент группы 717-об

 14.06.2021  
(подпись, дата)


Д.С. Тарасов

Руководитель  
канд.физ. – мат. наук,  
доцент

 14.06.2021  
(подпись, дата)

Д.В. Фомин

Консультант по БЖД  
канд.физ. – мат наук

 14.06.2021  
(подпись, дата)

В.Н. Аверьянов

Нормоконтроль

 14.06.2021  
(подпись, дата)

М. А. Аревков

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

Факультет: Инженерно-Физический

Кафедра: Стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ

Зам. зав. кафедрой

В. В. Соловьев

« 26 » апрель 2021 г.

### ЗАДАНИЕ

к выпускной квалификационной работе студента *Тарасова Дмитрия Сергеевича*

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка имитатора-транспортно-пускового контейнера спутников формата CubeSat для проведения вибродинамических испытаний

(утверждена приказом от 05.04.2021 №658-уч)

2. Срок сдачи студентом законченного проекта: 15.06.2021
  3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: стандарт спутников форматов CubeSat, копии патентных документов ТПК, документация на промышленный ТПК.
  4. Содержание выпускной квалификационной работы: литературный обзор существующих ТПК и ИТПК, проектная часть, безопасность жизнедеятельности, экономическая часть.
  5. Перечень материалов приложения: титульный лист, набор чертежей деталей ИТПК: крышка, основание, задняя вертикальная стенка, передняя вертикальная стенка, правая вертикальная стенка, левая вертикальная стенка, общий сборочный чертеж, заключение.
  6. Консультант по БЖД: Аверьянов В.Н. канд.физ. – мат наук
  7. Дата выдачи задания: 26.04.2021
- Руководитель выпускного квалификационного проекта: Фомин Д.В. доцент  
Задание принял к исполнению (дата): 26.04.2021

## РЕФЕРАТ

Настоящая бакалаврская работа содержит 66 страниц, 28 рисунков, 10 таблиц, 23 источника.

ТРАНСПОРТНО-ПУСКОВОЙ КОНТЕЙНЕР, НАНОСПУТНИК ФОРМАТА CUBESAT, ВИБРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ, ШВЕЛЛЕР, ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ, ВИБРОСТЕНД, ИМИТАТОР ТРАНСПОРТНО-ПУСКОВОГО КОНТЕЙНЕРА, РЕЗОНАНС

В работе представлены результаты проектирования универсального имитатора транспортно-пускового контейнера для проведения вибродинамических испытаний спутников формата CubeSat.

Цель работы – разработка универсального имитатора транспортно-пускового контейнера для проведения вибродинамических испытаний спутников стандарта CubeSat.

В проектной части представлен спроектированный ИТПК, а также результат его проверки на собственные частоты. В разделе безопасности жизнедеятельности рассмотрены требования при работе с электроустановками до 1000В и работе с вибростендом. В экономической части были рассчитаны затраты на материалы, комплектующие и услуги для изготовления ИТПК.

## СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	6
Введение	7
1 Общая часть	9
1.1 Обзор существующих ИТПК и ТПК	9
1.1.1 Транспортно-пусковой контейнер RU 2658401 С1.	9
1.1.2 Транспортно-пусковой контейнер RU 2631360 С1	11
1.1.3 Транспортно-пусковой контейнер RU 2541617 С1	13
1.1.4 Транспортно-пусковой контейнер «КосмоЛаб 12U»	15
1.1.5 Имитаторы транспортно-пускового контейнера НИИЯФ МГУ	16
1.2 Обзор вибростендов	18
1.2.1 Вибростенд IDEX.	19
1.2.2 Вибростенд VibraTest BRVD18	20
1.2.3 Вибростенд ВИКАМ 35/14	21
1.3 САПР для разработки ИТПК	22
2 Проектная часть	26
2.1 Разработка модели ИТПК	28
2.2 Предельные отклонения линейных размеров и допуски отверстий	30
2.3 Проектирование ИТПК	32
2.4 Результат изготовления ИТПК	44
2.5 Операционно-технологическая карта	45
3 Безопасность жизнедеятельности	51
3.1 Требования к системе освещения	51
3.2 Требования к температурно-влажностному режиму	51
3.3 Требования охраны труда при работе с вибростендом	52
3.4 Основные понятия электробезопасности	53
3.5 Технические меры и средства защиты, обеспечивающие безопасность при работе с электроустановками	54

3.6 Технические меры и средства защиты, обеспечивающие безопасность при работе с электроустановками	56
4. Экономическая часть	59
4.1 Материалы, комплектующие и услуги по изготовлению	59
4.2 Основная заработная плата	60
Заключение	62
Примечание	63
Библиографический список	64

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

ТПК – транспортно-пусковой контейнер;

ИТПК – имитатор транспортно-пускового контейнера;

ТГК – транспортный грузовой корабль;

РБ – разгонный блок;

РН – ракета-носитель

МКА – малый космический аппарат;

МКС – международная космическая станция;

САПР – система автоматизированного проектирования;

ППБ – правила пожарной безопасности.

## ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом количество запусков малых космических аппаратов во всем мире увеличивается. К ним относятся прежде всего спутники формата CubeSat. Это связано с тем, что спутники этого класса обладают небольшими массогабаритными размерами, имеют низкую стоимость изготовления и запуска. Время на изготовление этих спутников обычно не превышает 1-2 года.

Одним из распространенных способов доставки спутников на орбиту является их транспортировка с помощью ракет-носителей. Во время такой транспортировки любой спутник испытывает серьезные вибрационные нагрузки. Поэтому перед запуском космического аппарата по регламенту необходимо чтобы он прошел обязательные вибродинамические испытания. На сколько космический аппарат подготовлен к таким испытаниям зависит успех всей его миссии.

Обычно виброиспытания проводятся на специализированных вибростендах, которые не всегда включают в свой состав крепление необходимое для удержания испытуемого космического аппарата (КА) во время его тестирования. Испытания спутника должны проводиться в максимально приближенных условиях, соответствующих условиям его транспортировки, которые обычно обеспечиваются транспортно-пусковым контейнером (ТПК). Данное техническое изделие может быть адаптировано к столу вибростенда, однако на практике чаще всего используют имитаторы транспортно-пускового контейнера (ИТПК) ввиду их более низкой стоимости по сравнению с ТПК, и, простоты изготовления. Рынок ИТПК в настоящий момент только формируется и найти готовое решение не всегда представляется возможным. В частности, это касается универсальных ИТПК позволяющих протестировать спутники стандарта CubeSat форматом от 1U до 12U. Поэтому задача по проектированию универсальных ИТПК является на сегодняшний день очень актуальной. Исходя из этого целью данной выпускной квалификационной работы является: разработка универсально имитатора транспортно-пускового контейнера для проведения вибродинамических испытаний спутников стандарта CubeSat.

Для достижения поставленной цели, необходимо выполнить следующие задачи:

- 1) Изучить состав оборудования и принципы проведения вибродинамических испытаний.
- 2) Осуществить разработку универсального ИТПК для проведения вибродинамических испытаний.
- 3) Провести экономический расчет себестоимости изделия разработанного ИТПК.



## 1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ

### 1.1 Обзор существующих ИТПК и ТПК

Транспортно-пусковой контейнер – это устройство, которое защищает спутник от внешних воздействий при транспортировке, обеспечивает его запуск в космическое пространство и безударное отделение в заданное время.

Имитатор транспортно-пускового контейнера – устройство, которое создает те-же условия для спутника, что и ТПК до момента запуска.

Литературный обзор показал, что патентные базы содержат документы регистрирующие право интеллектуальной собственности в основном на ТПК. Их тоже можно использовать для проведения вибродинамических испытаний спутников. Однако следует учесть, что стоимость ТПК существенно выше стоимости ИТПК. Рассмотрим устройство известных ТПК на примере ряда патентов, поскольку проектируемый ИТПК должен имитировать их работу в ходе испытаний МКА.

#### 1.1.1 Транспортно-пусковой контейнер RU 2658401 C1

RU 2658401 C1 – универсальный транспортно-пусковой контейнер для малых космических аппаратов (спутников формата «CubeSat») имеет конфигурацию для запуска МКА формата 3U и 6U. [1]

Транспортно-пусковой контейнер состоит из не цельного корпуса с направляющими, толкателя по мере с одной подвижной платформой платформой и по меньшей мере одной поворотной крышки и ее устройство расфиксации, каждая направляющая съемная и выполнена в виде ступенчатого профиля, ступени которого неравнозначны, на одной из боковых поверхностей которых выполнены паз и угловая выборка, взаимодействующие при переустановке направляющих с ответными частями конкретного запускаемого малого космического аппарата, при этом на подвижной платформе толкателя смонтированы кронштейны, которые установлены на направляющих с возможностью перемещения, причем МКА взаимодействует с подвижной платформой толкателя либо через кронштейны, либо через съемные дистанционные втулки, установленные на

кронштейнах, либо через торцевую пластину, закрепленную на подвижной платформе толкателя, и кронштейны с фиксаторами, взаимодействующими с пазами направляющих.[1]

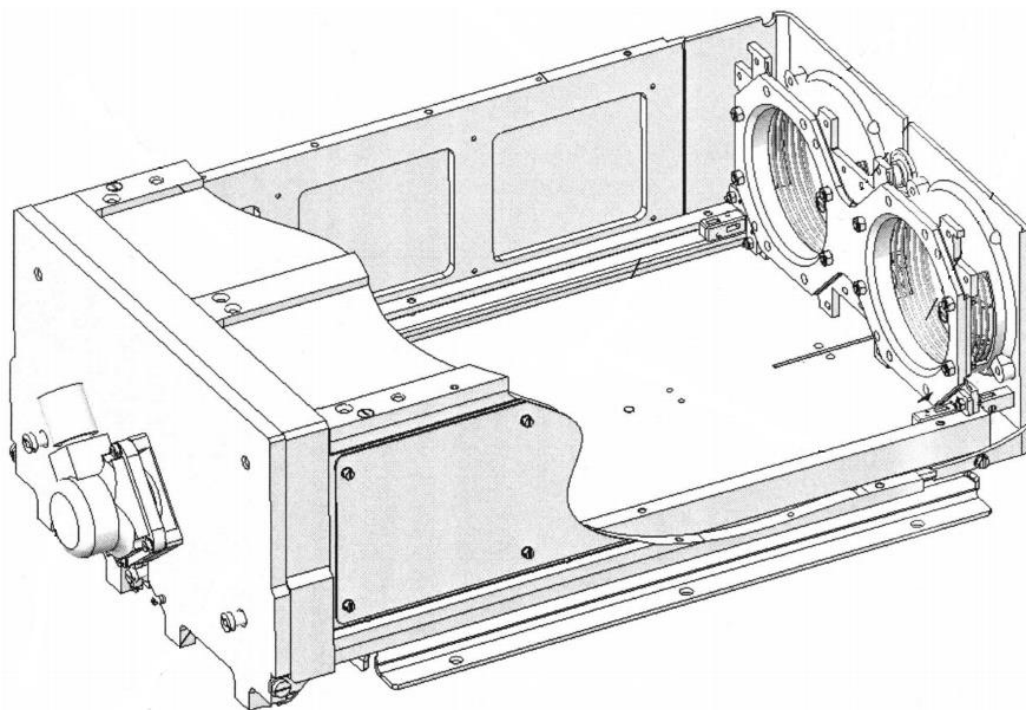


Рисунок 1 – Общий вид ТПК. Конфигурация для запуска МКА формата 6U использующего две направляющие

На вертикальных панелях имеются окна, предназначенные для доступа к элементам МКА, например, для зарядки батарей, проведения диагностики и т.п. Эти окна прикрыты крышками.

Для группового запуска МКА в корпусе ТПК на вертикальных панелях имеется паз для перегородки, которая отделяет МКА друг от друга, а также предусмотрены отверстия для крепления дополнительных направляющих.

Авторы изобретения указывают на то, что возможен вариант, позволяющий осуществить запуск МКА, когда в ТПК часть пространства, предназначенного для полезной нагрузки, остается незаполненным, в этом случае используют специальную проставку(болванку), размер которой позволяет изменить объем полезной нагрузки ТПК и исключить перемещение МКА при закрытой

поворотной крышке. Проставка размещается на направляющих корпуса между МКА и элементами толкателя.

Так же авторы выделяют еще одну отличительную особенность данного ТПК, а именно, что устройство расфиксации размещено на поворотной крышке или на корпусе ТПК, которое работает следующим образом:

После срабатывания устройства расфиксации и поворота под действием пружин кручения поворотной крышки подвижная часть толкателя начинает под действием пружин двигаться по направляющим, установленным в корпусе ТПК, толкая перед собой МКА. В случае, если планируется осуществить групповой запуск МКА с использованием проставки ее размещают на направляющих корпуса и прижимают к элементам толкателя пока не произойдет ее фиксация с помощью цапг. После запуска проставка остается в ТПК благодаря соединению цапг с подвижной частью толкателя.[1]

В данном изобретении не описывается принцип адаптации ТПК к столу вибростенда для проведения вибродинамических испытаний спутника. ТПК обозначен как универсальный, но в представленном варианте не поддерживает формат 12U спутника формата CubeSat.

#### 1.1.2 Транспортно-пусковой контейнер RU 2631360 С1

RU 2631360 С1 - Транспортно-пусковой контейнер для запуска малых космических аппаратов формата 3U.

Задачами, которые поставили перед собой авторы изобретения является повышение надежности ТПК путем обеспечения фиксации поворотной крышки после ее открытия, повышение точности запуска малых космических аппаратов, благодаря уменьшению воздействия сил трения между направляющими корпуса и толкателем при его движении.

Поставленные задачи решаются тем, что в транспортно-пусковом контейнере для запуска малых космических аппаратов, выполненном в виде корпуса, включающем четыре боковые стенки, из которых две диаметрально расположенные стенки имеют направляющие, заднюю стенку, переходную рамку, снабженного поворотной крышкой, крепящейся к переходной рамке и оснащенной по

меньшей мере одной пружиной, переводящей в свободном состоянии поворотную крышку в открытое положение, а также расположенными внутри корпуса стартовой пружиной и толкателем с размещенным на нем магнитом, на переходной рамке корпуса установлен узел фиксации поворотной крышки, который своими подпружиненными стопорами взаимодействует с пазами поворотной крышки в момент ее открытия на заданный угол, при этом на толкателе размещены подшипники, взаимодействующие с направляющими корпуса.[2]

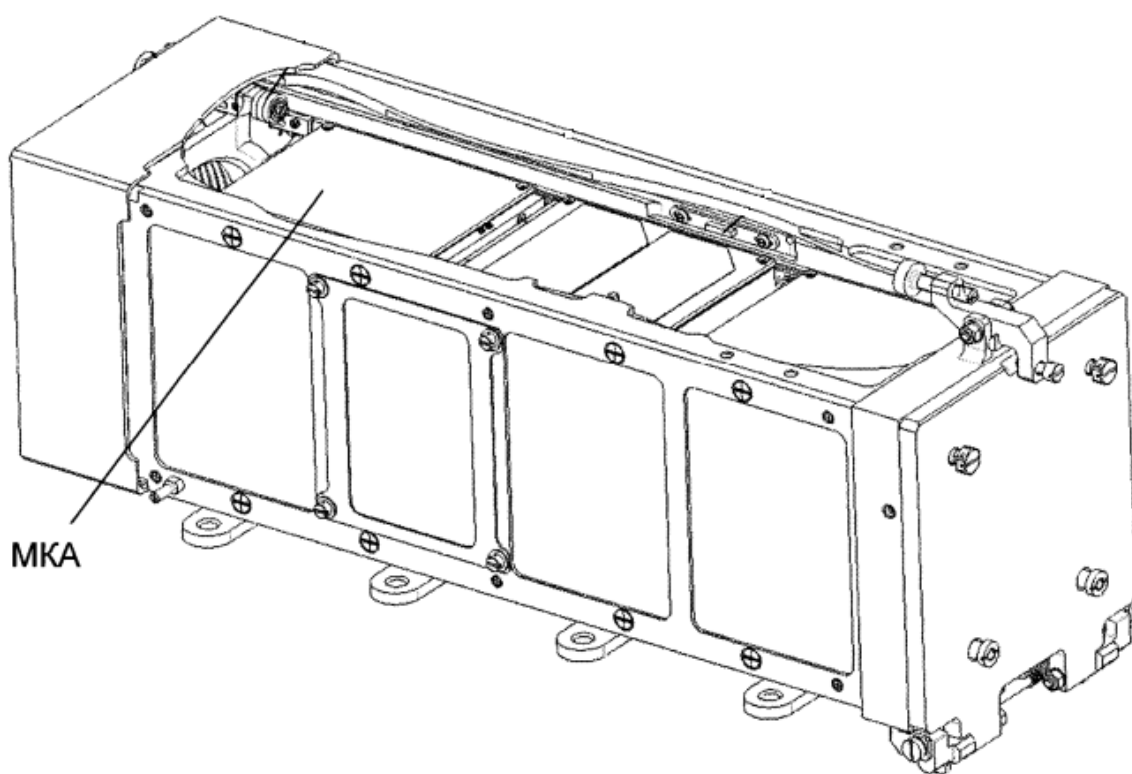


Рисунок 2 – Общий вид ТПК, на котором видна установка датчика, переключение которого производится магнитом.

Устройство открытия поворотной крышки работает следующим образом:

При повороте под действием пружин поворотной крышки ее выступы двигаются вдоль подпружиненных стопоров. Для уменьшения трения со стороны контакта с выступами подпружиненные стопоры имеют скругление. При повороте поворотной крышки на заданный угол подпружиненные стопоры входят в пазы выступов поворотной крышки, и она фиксируется.[2]

При движении толкателя под действием стартовой пружины он с помощью подшипников перемещается по направляющим верхней и нижней стенок корпуса. Благодаря подшипникам трение скольжения между толкателем и направляющими заменяется трением качения. Когда магнит, закрепленный на толкателе, доходит до уровня датчика, тот срабатывает и подается сигнал, что пуск произошел, так как для того, чтобы магнит оказался около датчика, необходимо, чтобы поворотная крышка открылась и толкатель,двигающий МКА, выдвинулся на заданный уровень.[2]

Таким образом, повышается надежность ТПК за счет фиксации поворотной крышки после ее открытия и точность запуска МКА, благодаря установке подшипников на толкателе.[2]

В данном изобретении не описывается принцип адаптации ТПК к столу вибростенда для проведения вибродинамических испытаний спутника и не описывается возможность использования проставок для запуска МКА формата 1U и 2U. Значит, что такой ТПК поддерживает только спутники формата 3U.

### 1.1.3 Транспортно-пусковой контейнер RU 2541617 C1

RU 2541617 C1 - транспортно-пусковой контейнер для запуска пико- и нано-спутников в виде корпуса с технологическими крышками, включающего четыре боковые стенки, из которых две диаметрально расположенные стенки имеют по две направляющие С-образной формы с заходной частью, заднюю стенку и заходную рамку.[3]

Авторы патента указывают на задачи, которые решает данный ТПК, а именно:

- обеспечение защиты пико- и наноспутников формата CubeSat от внешних воздействий в процессе транспортировки и доставки на пилотируемую орбитальную станцию, хранения внутри герметичного отсека станции до пуска;

- снижение динамических нагрузок на конструкцию пикоспутника на всех этапах эксплуатации;[3]

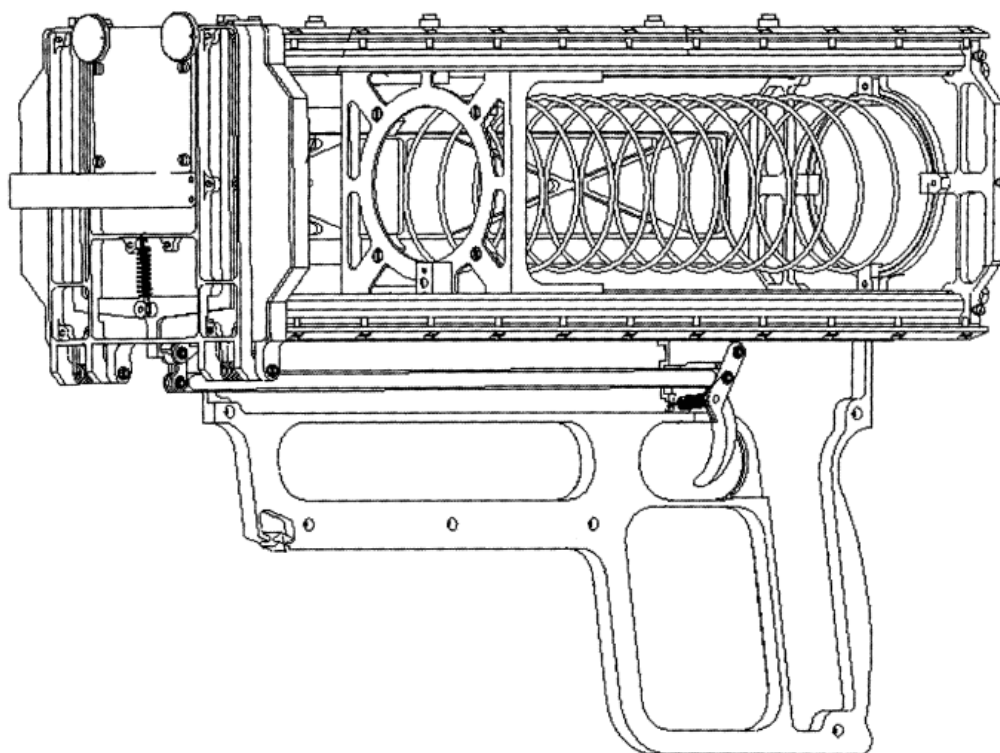


Рисунок 3 – Общий вид ГПК со стороны поворотной крышки

- расширение функциональных возможностей с целью обеспечения проведения всех видов работ внутри и вне корабельной деятельности экипажа пилотируемой орбитальной станции в случаях выноса пико- и наноспутников за пределы герметичного отсека, закрепления транспортно-пускового контейнера на внешней поверхности орбитальной станции для последующего запуска спутников в заданном направлении, а также автоматического запуска пико- и наноспутников в случае выведения на орбиту попутным грузом с помощью ракет-носителей, в том числе с разгонными блоками;[3]

- проведение многократного ручного запуска пико- и наноспутников членами экипажа пилотируемой космической станции, например МКС, при работе в открытом космосе с целью снижения финансово-экономических затрат на изготовление, запуск и на наземную экспериментальную отработку.[3]

Устройство запуска может быть выполнено в виде ручки со спусковым крючком или в виде электромагнита. Устройство фиксации поворотной крышки в закрытом положении предпочтительно выполнено в виде невыпадающих винтов и задвижки, перемещаемой с помощью механической рычажной системы,

связанной с устройством запуска, и возвращаемой в исходное состояние с помощью пружины. На боковой стенке корпуса со стороны оси вращения поворотной крышки целесообразно закрепить демпфер. На толкателе предпочтительно установлено устройство для срабатывания контакта активации спутника, выполненное в виде магнита.[4]

В данном изобретении не описывается принцип адаптации ТПК к столу вибростенда для проведения вибродинамических испытаний спутника. Транспортно-пусковой контейнер поддерживает только спутники CubeSat форматом до 3U.

Далее рассмотрим непатентованные ИТПК.

#### 1.1.4 Транспортно-пусковой контейнер «КосмоЛаб 12U»

Транспортно-пусковой контейнер «КосмоЛаб» серии 12U предназначены для запуска малых космических аппаратов типа CubeSat типоразмеров от 1U до 12U. ТПК серии 12U возможны в любой конфигурации для необходимых типоразмеров CubeSat ТПК «КосмоЛаб» изначально интегрируются под ТГК «Прогресс-МС» и РБ«Фрегат»/РН«Союз», возможна адаптация под другие РБ/РН.[4]

Технических характеристик и подробного принципа работы ТПК найти не удалось, но можно сделать вывод, что назначение, принцип работы, основные технические характеристики всех конфигураций ТПК «КосмоЛаб» серии 12U одинаковы. Конфигурации отличаются друг от друга количеством слотов для размещения МКА CubeSat, конструкцией и количеством крышек и толкателей, наличием направляющих и перегородок, наличием электрических соединителей и узлов фиксации.

По найденным изображениям видно, что транспортно-пусковой контейнер состоит из корпуса; пускового устройства; направляющих для выведения спутников; поворотные крышки; окон, расположенных на боковых стенках ТПК для доступа к спутнику, которые прикрыты крышками; электрозамками и датчиками с кабелями.



Рисунок 4 – ТПК «КосмоЛаб»

Плюсами данного ТПК можно выделить его универсальность по запуску спутников CubeSat любой конфигурации и возможность адаптации под любые РН и РБ.

#### 1.1.5 Имитаторы транспортно-пускового контейнера НИИЯФ МГУ

Поиск информации об имитаторах транспортно-пускового контейнера не дал результат - не было найдено ни одного официального открытого к доступу технического описания как изобретения, так и разработки. При этом точно известно, что в Научно-исследовательском институте ядерной физики МГУ используются ИТПК показанные на рисунках 5 и 6, очевидно разработанные по индивидуальному заказу. Данный Научно-исследовательский институт является партнером Амурского государственного университета по Программе «Универсат», предложенной ГК Роскосмос для запуска университетских спутников. При поддержке партнера, в 2019 году АмГУ с космодрома Восточный был запущен первый университетский спутник Дальнего Востока «AmGU-1» («AmurSat»).





Рисунок 5 – Модификация ИТПК для МКА формата 3U в составе виб-  
ционного стенда



Рисунок 6 – Модификация ИТПК для МКА формата 6U CubeSat

Принцип работы и устройство обоих ИТПК одинаков, отличаются они лишь форматом спутника, который необходимо протестировать.

Данные ИТПК, в отличие от ТПК, имеют более простую конструкцию и отсутствие автоматической электроники, кабелей и датчиков.

Анализируя представленные фотографии нетрудно заметить, что имитаторы транспортно-пусковых контейнеров имеют отверстия на боковых стенках для доступа к спутнику. Каждый ИТПК крепится к платформе, благодаря которой становится возможна установка ИТПК к вибростенду. Открытие поворотной крышки осуществляется вручную.

Недостатком таких имитаторов транспортно-пусковых контейнеров является то, что:

- изготавливаются они под конкретный формат, т.е. отсутствует универсальность, нет возможности протестировать спутник CubeSat другого формата;
- сложная технологическая конструкция.

## **1.2 Обзор вибростендов**

Электродинамические вибростенды для испытаний — это вибрационная тестирующая или калибровочная установка, на активной базе которой устанавливаются объекты для вибрационных тестов. В свою очередь испытательные вибростенды делятся на вибростенды специального назначения и универсальные. Частоту и размах колебаний рабочей базы универсального электродинамического вибростенда следует плавно регулировать в строгом диапазоне при помощи средств координирования виброиспытаний.

Испытательный вибростенд спроектирован с учетом долгого срока использования, обладает сильным запасом прочности к диаметральному колебанию и жестким осевым коэффициентом. Вибростолы стендов обеспечены системой воздушной компенсации нагрузок, что гарантирует сохранения стабильного состояния рабочей платформы даже при большом весе тестируемого объекта.[5]

Принцип работы и устройство вибростендов для диагностики зависит от их типа. Но главная их задача общая — создавать вибрации разных типов и

направлений, чтобы проверить износостойкость, состояние и надежность продукта. Наиболее важные параметры вибростенда:

- пиковая синусоидальная сила;
- частотный диапазон;
- смещение;
- пиковое ускорение;
- пиковая скорость.

Проведем обзор наиболее известных вибростендов.

### 1.2.1 Вибростенд IDEX.

Электромеханический вибростенд имеет следующие отличительные способности:

- возможность встраивания в технологическую линию;
- отсутствия влияния вибраций на место установки;
- все функциональные части вибрационных тестеров выполнены в едином корпусе;
- возможность отдельного исполнения.[6]



Рисунок 7 – Вибростенд IDEX

Таблица 1 – Технические характеристики вибростенда IDEX

Параметр	Значение
Номинальный диапазон частот	5-67 Гц
Максимальная нагрузка	100 кг
Максимальное ускорение (пустой стол)	0,1-10g
Тип вибрации	Синус
Направление вибрации	Вертикальное
Режим работы	Фиксированная частота, качающаяся частота(линейная), ступенчатая частота.
Питание	220В, 50Гц

### 1.2.2 Вибростенд VibraTest BRVD18

Стенд предназначен для испытаний изделий на воздействие вибрации синусоидального типа до 100 Гц. Блок управления и контроля встроен в станину стенда. Контроль параметров испытаний осуществляется при помощи ПК. Данная система управления обеспечивает ввод параметров испытаний, настройку параметров испытаний, оповещение в случае возникновения аварийных ситуаций.[7]



Рисунок 8 – Вибростенд VibraTest BVRD 18

Таблица 2 – Технические характеристики вибростенда VibraTest BVRD 18

Параметр	Значение
Максимальная нагрузка	45 кг
Номинальный диапазон частот	До 100 Гц
Максимальное ускорение (пустой стол)	10g
Перемещение (пустой стол)	До 2 мм
Тип вибрации	Синус
Направление вибрации	Вертикальное
Питание	220В, 50Гц
Размер рабочего стола	457 x 457 мм

### 1.2.3 Вибростенд ВИКАМ 35/14

Вибростенд испытательный механический ВИКАМ-35/14 предназначен для испытаний в соответствии с ГОСТ РВ 20.57.305-98 на вибропрочность, виброустойчивость и транспортную тряску изделий.

Вибростенд отличается простотой управления. Конструктивные решения вибростенда обеспечивают удобство в эксплуатации и высокую надежность оборудования.[8]



Рисунок 9 – Вибростенд ВИКАМ 35/14

Таблица 3 – Технические характеристики вибростенда ВИКАМ 35/14

Параметр	Значение
Максимальная нагрузка	35 кг
Размер рабочего стола	500x400 мм
Номинальный диапазон частот	20-80 Гц
Максимальное ускорение (пустой стол)	10g
Перемещение (пустой стол)	До 3 мм
Тип вибрации	Синус
Направление вибрации	Вертикальное
Режим работы	Фиксированная частота, качающая частота(линейная), ступенчатая частота.
Питание	220В, 50Гц
Вес вибростенда	87 кг

### 1.3 САПР для разработки ИТПК

Для решения поставленной задачи было принято решение разрабатывать ИТПК в системе автоматизированного проектирования.

В Амурском государственном университете используются следующие лицензионные САПР, такие как: AutoCad, Компас 3D, SolidWorks.

AutoCAD — это двух- и трёх- мерная система автоматизированного проектирования и черчения, разработанная компанией Autodesk. AutoCAD нашла широкое применение в машиностроении, строительстве, архитектуре и других отраслях промышленности.

В области двумерного проектирования AutoCAD позволяет использовать элементарные графические примитивы для получения более сложных объектов. Кроме того, программа предоставляет весьма обширные возможности работы со слоями и аннотативными объектами (размерами, текстом, обозначениями). Использование механизма внешних ссылок позволяет разбивать чертёж на составные файлы, за которые ответственны различные разработчики, а динамические

блоки расширяют возможности автоматизации 2D-проектирования обычным пользователем без использования программирования. AutoCAD включает в себя полный набор инструментов для комплексного трёхмерного моделирования. AutoCAD позволяет получить высококачественную визуализацию моделей с помощью системы рендеринга. Также в программе реализовано управление трёхмерной печатью (результат моделирования можно отправить на 3D-принтер). Тем не менее следует отметить, что отсутствие трёхмерной параметризации не позволяет AutoCAD напрямую конкурировать с машиностроительными САПР среднего класса.[9]

Система «Компас-3D» предназначена для создания трёхмерных ассоциативных моделей отдельных деталей (в том числе, деталей, формируемых из листового материала путём его гибки) и сборочных единиц, содержащих как оригинальные, так и стандартизованные конструктивные элементы. Параметрическая технология позволяет быстро получать модели типовых изделий на основе проектированного ранее прототипа. Многочисленные сервисные функции облегчают решение вспомогательных задач проектирования и обслуживания производства.

Система «Компас-3D» включает следующие компоненты: система трёхмерного твердотельного моделирования, универсальная система автоматизированного проектирования «Компас-График» и модуль формирования спецификаций. Ключевой особенностью «Компас-3D» является использование собственного математического ядра и параметрических технологий.[10]

SolidWorks— программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения.

Решаемые задачи:

- 3D-проектирование изделий (деталей и сборок) любой степени сложности с учётом специфики изготовления;
- создание конструкторской документации в строгом соответствии с ГОСТ;

- промышленный дизайн;
- обратная разработка;
- проектирование коммуникаций (электрожгуты, трубопроводы и пр.);
- инженерный анализ (прочность, устойчивость, теплопередача, частотный анализ, динамика механизмов, газо/гидродинамика, оптика и светотехника, электромагнитные расчёты, анализ размерных цепей и пр.);
- экспресс-анализ технологичности на этапе проектирования;
- подготовка данных для ИЭТР;
- управление данными и процессами на этапе КПП.[11]

Завершая данную главу, можно сделать выводы:

1. Были изучены существующие транспортно-пусковые контейнеры и имитаторы транспортно-пусковых контейнеров, их конструкции и принципы работы. По данным литературного обзора установлено, что в Российских и зарубежных патентных базах нет упоминаний об универсальных имитаторах транспортно-пусковых контейнеров для проведения вибродинамических испытаний спутников формата CubeSat в диапазоне от 1U до 12U. Существующие ИТПК, как правило, создаются под отдельные конфигурации спутников. ИТПК по массогабаритным характеристикам уступают ТПК. Исходя из этого, можно утверждать, что предлагаемая разработка ИТПК актуальна.

2. Были рассмотрены несколько известных стендов для проведения виброиспытаний. Они отличаются диапазоном частот, максимальной нагрузкой, режимами работ и размерами рабочего стола. Можно сделать вывод о том, что для проведения виброиспытаний спутников вибростенд должен обязательно иметь столик, к которому крепится ИТПК/ТПК, тип вибрации должен быть как минимум синусоидальным с вертикальным направлением.

3. Анализ доступных в Амурском государственном университете САПР показал, что для решения поставленных задач лучше подходит SolidWorks, так как SolidWorks имеет большой выбор инструментов для проектирования 3D деталей и сборок; обширную библиотеку со стандартными изделиями;



доступен инженерный анализ, а именно частотный анализ, что позволяет провести имитацию вибрационных нагрузок на этапе проектирования.

## 2 ПРОЕКТНАЯ ЧАСТЬ

В рамках данной выпускной квалификационной работы была поставлена задача разработать ИТПК для вибродинамических испытаний спутников CubeSat. Для того, чтобы спроектировать такой ИТПК необходимо было использовать габаритные размеры спутников данного формата. На первом этапе проектирования ИТПК был определен максимальный по размеру формат CubeSat. Добавив дополнительные элементы внутрь ИТПК под такой формат (например, перегородки) появляется возможность установить в него спутника меньшего размера. На рисунке 10 представлен наибольший из стандарта CubeSat конфигурацией 12U с размерами 226,3x226,3x340,5 мм. Размеры взяты согласно стандарту Калифорнийского политехнического и Стэнфордского университетов. [21]

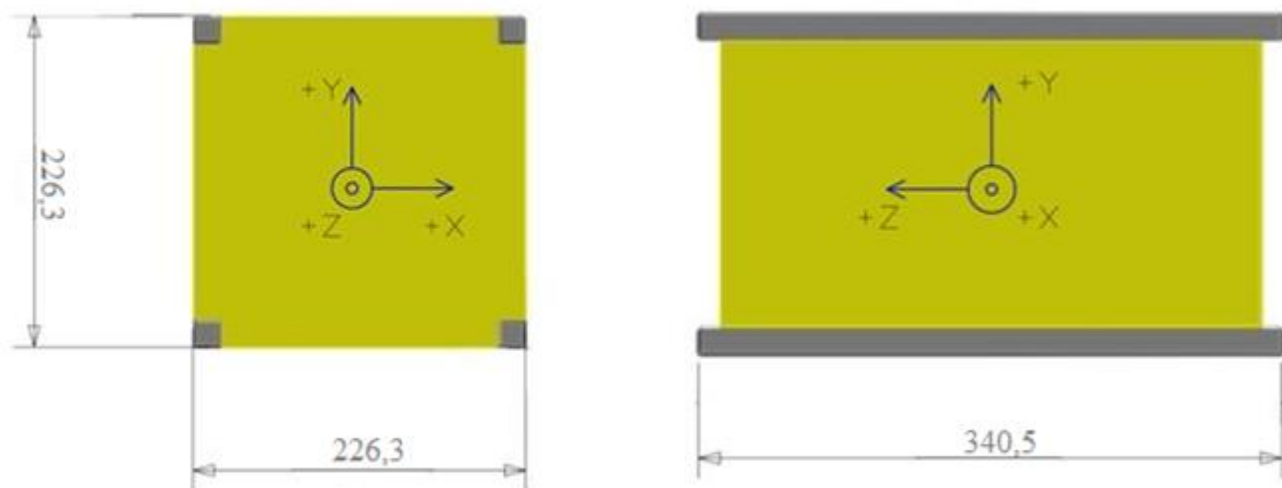


Рисунок 10 – Габаритные размеры спутника CubeSat 12U [21]

Поскольку задача проектирования ИТПК заключалась в том, чтобы спроектировать универсальное устройство, то помимо типоразмеров спутников формата 12U потребовались так же данные на форматы 1U, 2U, 3U и 6U.

На рисунке 11 представлен спутник формата CubeSat 6U с габаритными размерами.

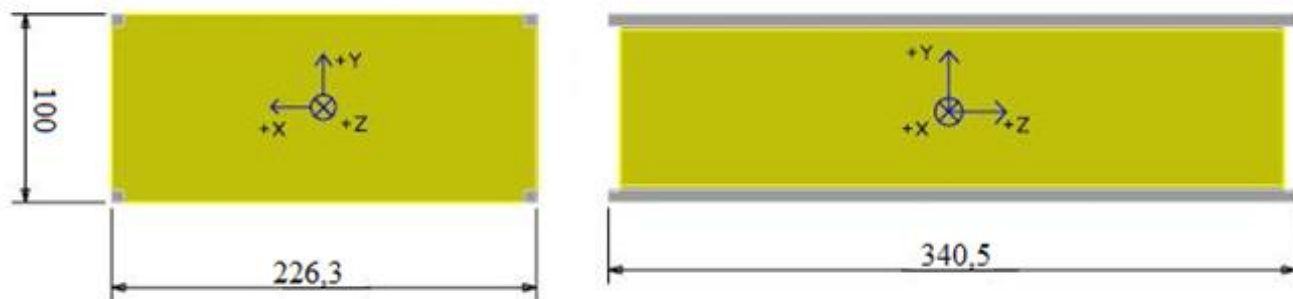


Рисунок 11 – Габаритные размеры спутника CubeSat 6U [21]

Габаритные размеры спутника CubeSat 3U представлены на рисунке 12.

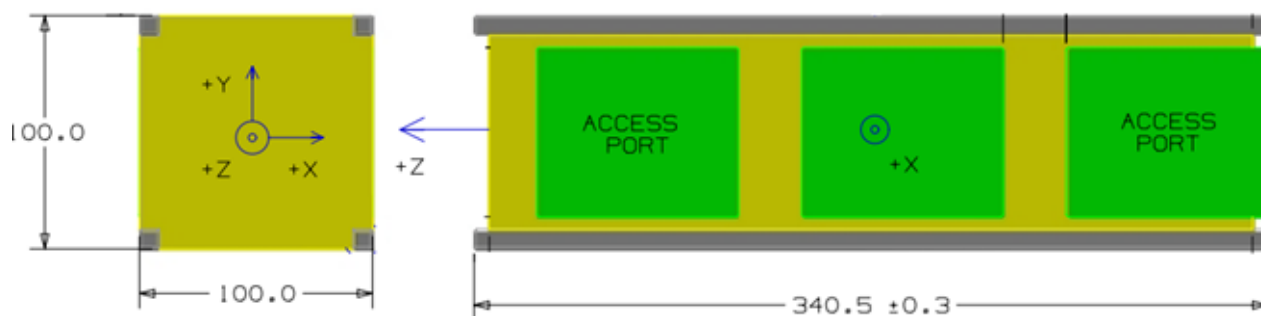


Рисунок 12 – Габаритные размеры спутника CubeSat 3U.

На рисунке 13 представлен спутник формата 2U и его габаритные размеры.

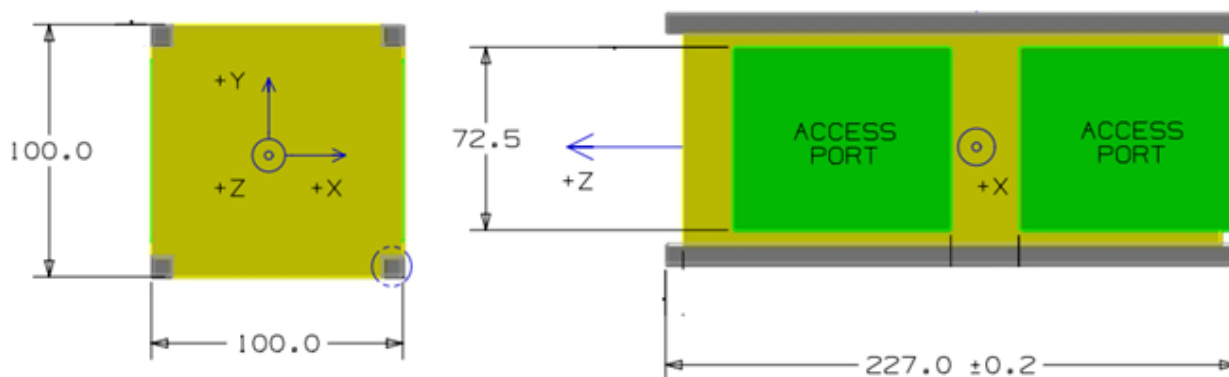


Рисунок 13 – Габаритные размеры спутника CubeSat 2U [21]

На рисунке 14 представлен спутник формата 1U и его габаритные размеры.

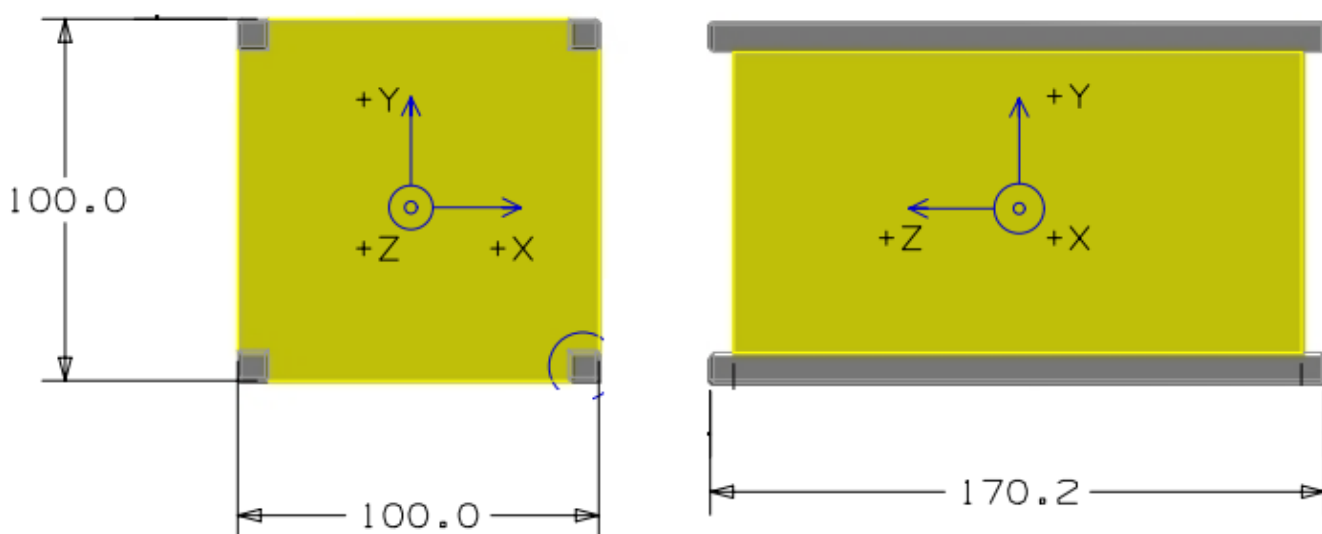


Рисунок 14 – Габаритные размеры спутника CubeSat 1U [21]

Было предложено задачу по установке разноформатных спутников CubeSat в ИТПК решить переустановкой направляющих, а в случае форматов 1U и 2U еще и специальными проставками, заполняющими свободное пространство имитатора.

### 2.1 Разработка модели ИТПК

При изучении существующих ТПК было установлено, какие элементы являются обязательными для них и для проектируемого имитатора транспортно-пускового контейнера. При этом были учтены все технические особенности для достижения максимальных эксплуатационных характеристик разрабатываемого устройства. К ним относятся: надежность устройства, возможность адаптировать его к рабочим столам различных вибростендов, простота конструкции, её универсальность, минимальный вес. После этого с использованием САПР SolidWorks была начата разработка вариантов ИТПК в виде макетов. Первый из таких макетов представлен на рисунке 15.

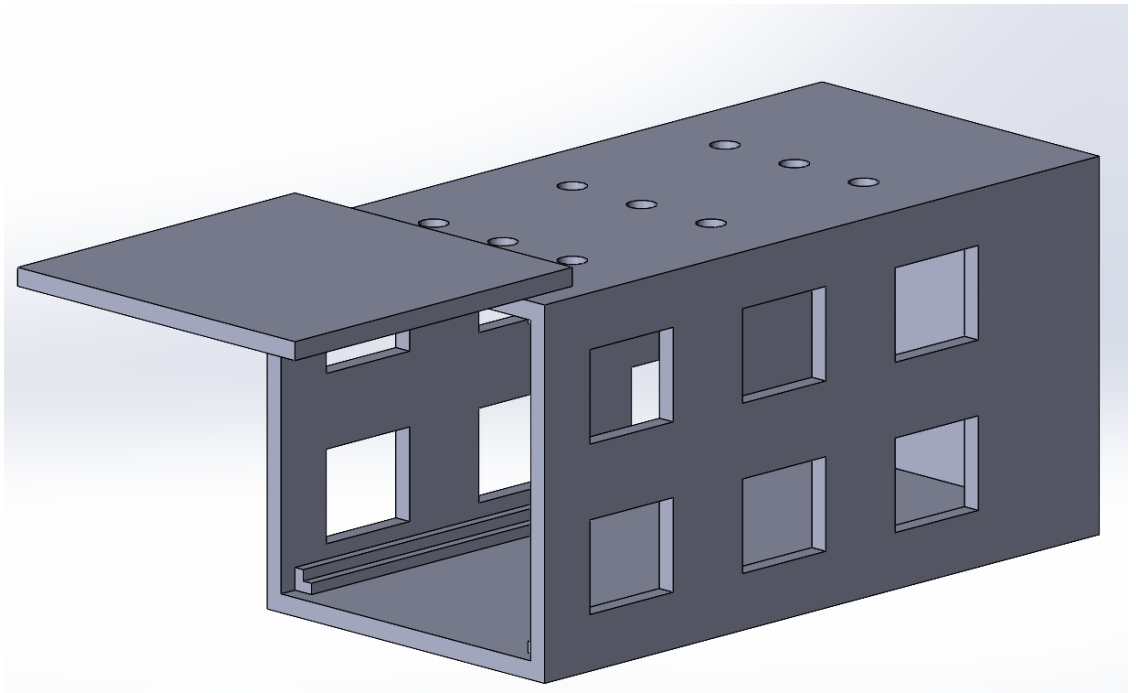


Рисунок 15 – Общий вид макета ИТПК

После проектирования макета начался поиск решений по его изготовлению.

Первым вариантом стало предложение по созданию ИТПК аддитивным способом (с помощью порошкового металлического 3D принтера). Для изготовления таким способом был спроектирован соответствующий макет, представленный на рисунке 16.

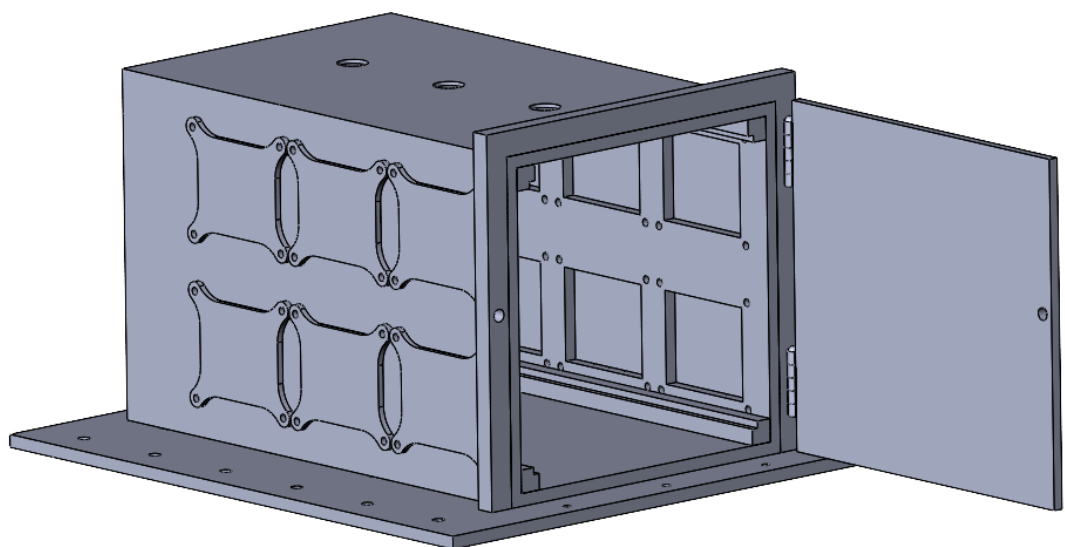


Рисунок 16 – Модель ИТПК для порошкового металлического 3D принтера

После создания модели ИТПК, был рассчитан её объем. Исходя из современных расценок на изготовление деталей аддитивным способом определяемых объемом изделий было установлено, что стоимость данной модели будет сравнима со стоимостью с более сложным ТПК. Исходя из этого было принято решение не использовать данный способ изготовления ИТПК.

Поэтому за основу был выбран за основу второй способ создания ИТПК, путем формовки его составных частей из общедоступного прокатного материала.

## 2.2 Предельные отклонения линейных размеров и допуски отверстий.

При изготовлении деталей неизбежны погрешности их размеров. Невозможно изготовить деталь с абсолютной точностью. В собранном изделии погрешности деталей, суммируясь вызывают определенные отклонения показателей точности изделий [19]. Поэтому, при проектировании ИТПК за основу для предельных отклонений линейных размеров был принят межгосударственный стандарт «Предельные отклонения линейных и угловых размеров с неуказанными допусками» ГОСТ 30893.1.

Так как все погрешности в собранном изделии суммируются, то для большинства линейных размеров класс точности был выбран f из таблицы 4 представленной в вышеуказанном ГОСТе.

Таблица 4 – Предельные отклонения линейных размеров

Класс точности	Предельные отклонения для интервалов номинальных размеров, мм				
	от 0,5 до 3	св. 3 до 6	св. 30 до 120	св. 120 до 400	св. 400 до 1000
Точный f	±0,05	±0,05	±0,15	±0,2	±0,3
Средний m	±0,10	±0,10	±0,30	±0,5	±0,8
Грубый c	±0,20	±0,30	±0,80	±1,2	±2,0

Допуск для отверстий определяется по ГОСТ 25346-86 «Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок» и для отверстий с

резьбой по ГОСТ 19257-73 «Межгосударственный стандарт. Отверстия под нарезание метрической резьбы». Ключевыми определениями при выборе допусков являются:

Номинальный размер – размер, относительно которого определяются отклонения [20].

Допуск – алгебраическая разность между верхним и нижними отклонениями [20].

Поле допуска – поле, ограниченное наибольшим и наименьшим предельными размерами и определяемое величиной допуска и его положение относительно номинального размера [20].

Квалитет (степень точности) – совокупность допусков, рассматриваемых как соответствующие одному уровню точности для всех номинальных размеров [20].

Для отверстий левой и правой вертикальных стенок, спроектированного ИТПК, представленных на рисунке 18, диаметр которых равен 55мм и 72,5 мм назначен квалитет 12, допуск Н. Н12 характеризующий несопрягаемые размеры. Для резьбовых отверстий с номинальным диаметром резьбы 4мм и 6мм квалитет и допуск определялся согласно ГОСТ 19257-73 через шаг резьбы и номинальный диаметр отверстия. Для указанных отверстий было присвоено поле допуска Н6.

Такое же поле допуска имеют резьбовые отверстия в основании ИТПК (смотри рисунок 17) с номинальным диаметром резьбы 4мм и 6мм. Аналогично было определено поле допуска для резьбового отверстия 8мм, принятое равным G6.

Задняя вертикальная стенка (см. рисунок 19) имеет смотровое (несопрягаемое) отверстие диаметром 90 мм, которое получило поле допуска Н12. Отверстия для установки толкателя, имеющий диаметр 10 мм, получили поле допуска Н7, т.к. оно применяется для неподвижных соединениях, при высоких требованиях центрирования часто разбираемых деталей. Отверстия для соединения крышки и основания имеют диаметр 6 мм, с полем допуска, которое также должно применяться для неподвижных соединений. Поэтому для этих отверстий

оно равно Н6. Для отверстия под резьбовую шпильку диаметром 12 мм, поле допуска было присвоено Н8, поскольку в этом случае назначается для подвижных соединений, которые должны легко передвигаться при настройках и регулировании с последующей затяжкой в рабочее положение.

Поле допуска Н8 применяется и для отверстий направляющих в передней вертикальной стенке, изображенной на рисунке 20. Отверстия для упоров имеют резьбовое отверстие диаметром 3 мм. Согласно ГОСТ 19257-73, через шаг резьбы и номинальный диаметр отверстия назначается допуск Н5.

Крышка, изображенная на рисунке 21, имеет окна, предназначенные для установки датчика виброметра и других приборов на корпус спутника с радиусом 20 мм и 30 мм. Поскольку эти окна являются несопрягаемыми, то для них был назначено поле допуска Н12. Резьбовые отверстия для крепления крышки и угловых направляющих спутника имеют поле допуска Н7 согласно также ГОСТ 19257-73.

### **2.3 Проектирование ИТПК**

Было принято решение изготавливать ИТПК из швеллера и листового металла сплава алюминия АМГ2М. Лист из этого сплава имеет следующие преимущества:

- антикоррозийная стойкость;
- пластичность при обработке;
- низкий удельный вес, обеспечивающий легкость материала;
- высокая прочность;
- устойчивость к воздействию низких температур с сохранением всех свойств материала.

Ключевыми свойствами при выборе материала АМГ3М послужили: пластичность, низкий удельный вес и высокая прочность. Пластичность сплава позволяет получить швеллер из листового металла. Преимущество в низком удельном весе, также стало решающим при выборе материала, т.к. имеется ограничение в массе максимальной нагрузки на вибростенд.



Разрабатываемый имитатор транспортно-пускового контейнера имеет основание в виде плиты, изображенное на рисунке 17, с отверстиями для закрепления его на вибростенде, угловых направляющих и дополнительным отверстием в центре для уменьшения массы.

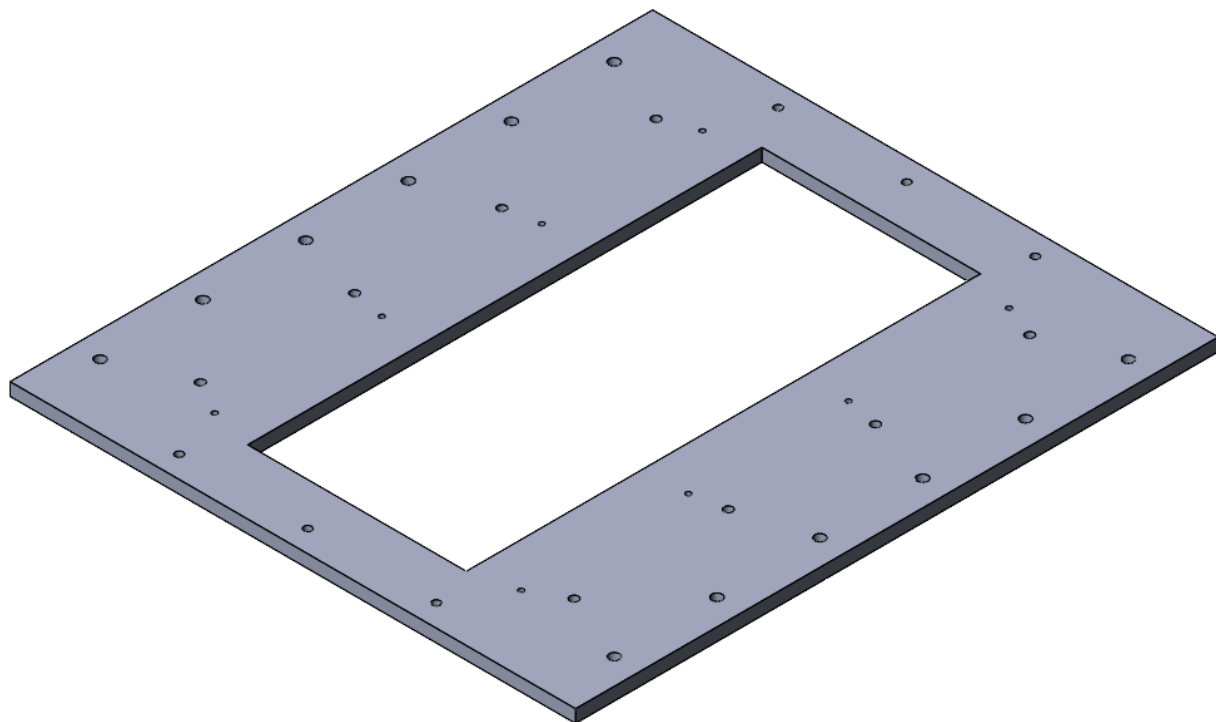


Рисунок 17 – Основание ИТПК

Вертикальные боковые стенки выполнены из швеллера, имеют по 6 отверстий, предназначенные для доступа к элементам спутника, установленного внутрь ИТПК, и по 2 отверстия для уменьшения общей массы конструкции и создания баланса масс между передней частью ИТПК и задней, а также доступа к толкателю спутника (представлен на 8 листе под №7).

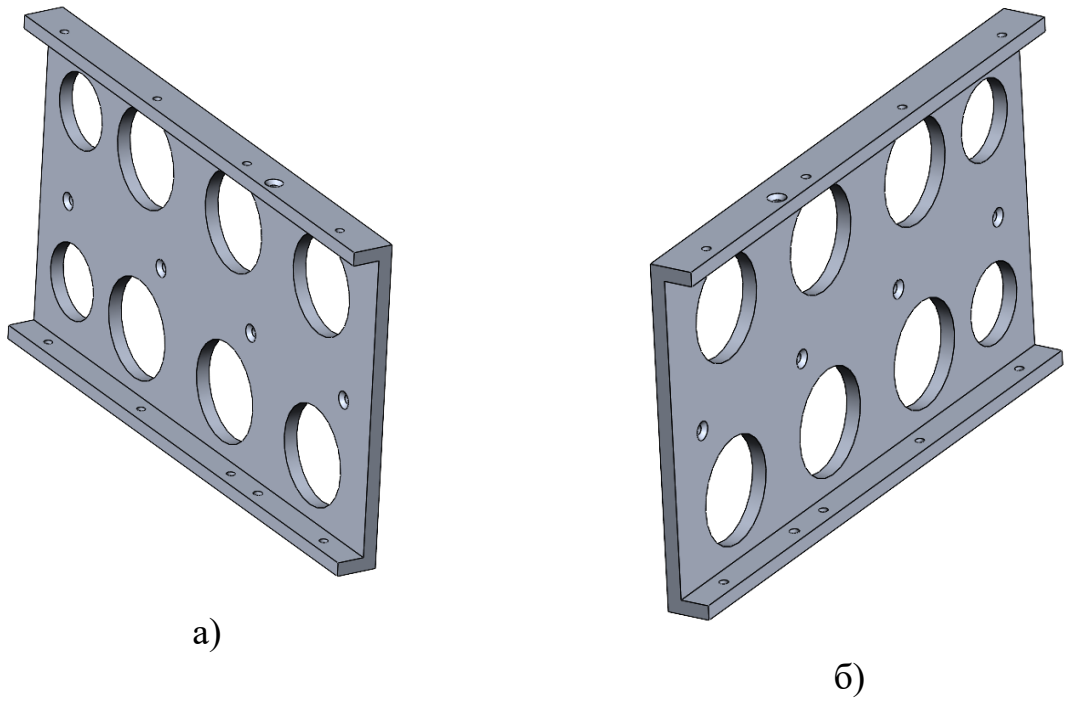


Рисунок 18 – Боковая вертикальная стенка ИТПК: а – левая; б – правая

Задняя вертикальная стенка имеет отверстие по центру, оно является дополнительным смотровым окном, 4 отверстия для установки толкателя спутника и 2 отверстия по бокам предназначены для резьбовой шпильки.

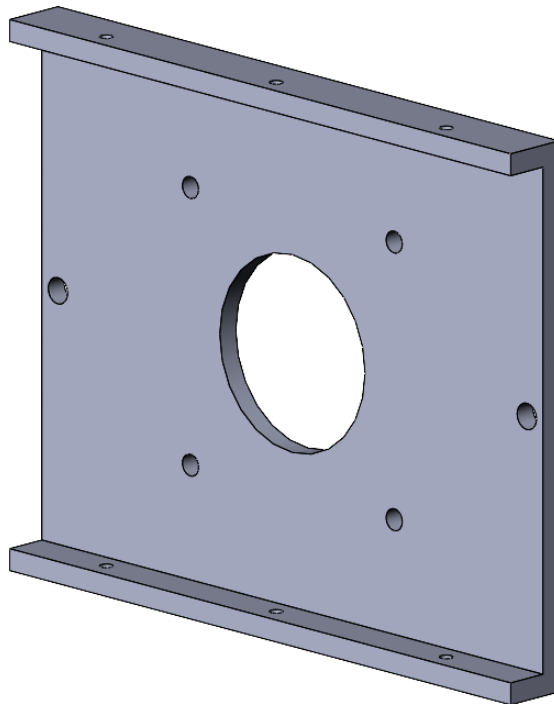


Рисунок 19 – Задняя вертикальная стенка ИТПК

Передняя вертикальная стенка выполнена из алюминиевого листа с четырьмя отверстиями для направляющих, которые устанавливаются для предотвращения перекосов стенки при установке спутника, двумя отверстиями для резьбовой шпильки и восемью отверстиями для установки упоров. Фиксируется передняя вертикальная стенка, помимо резьбовых шпилек, пластинами, которые крепятся к верхней крышке и основанию.

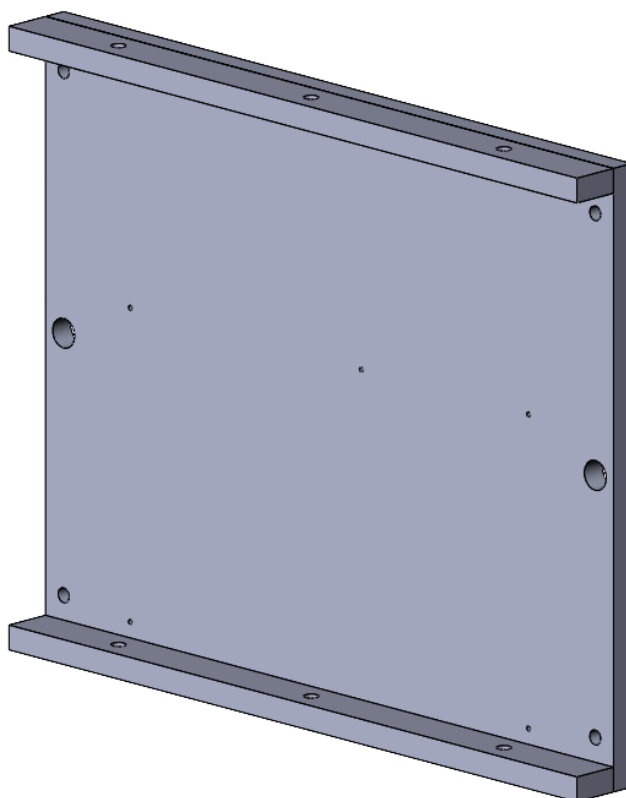


Рисунок 20 – Передняя вертикальная стенка ИТПК

Крышка имеет отверстия для крепления к вертикальным стенкам и угловых направляющих. Также имеет окна, предназначенные для установки датчика виброметра и других приборов на корпус тестируемого спутника при вибродинамических испытаниях и также для уменьшения общей массы.

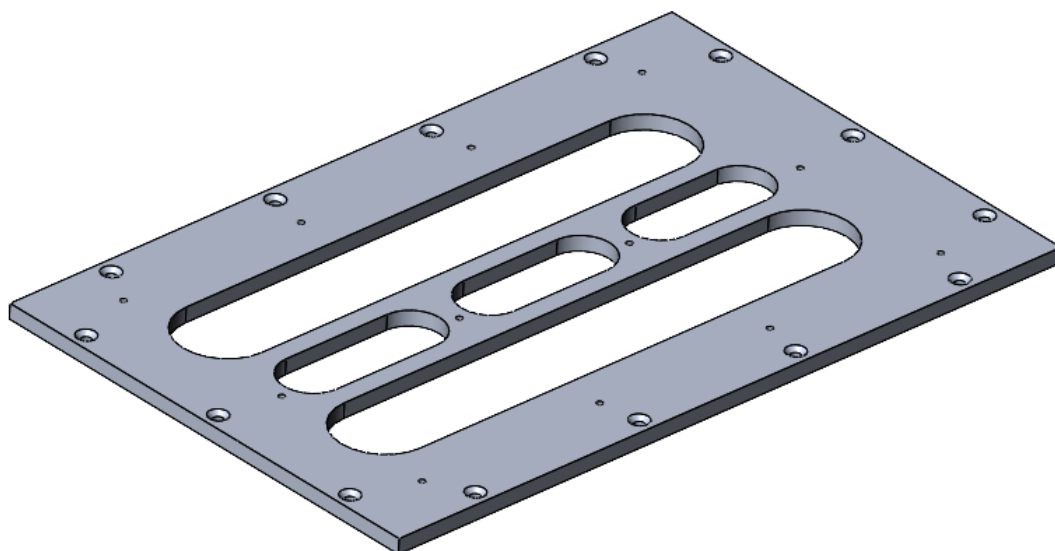


Рисунок 21 – Верхняя крышка ИТПК

Перегородка состоит из листового металла с отверстиями для крепления к вертикальным боковым стенкам ИТПК и угловых направляющих спутников. Предназначена для испытания спутников CubeSat 1U – 6U.

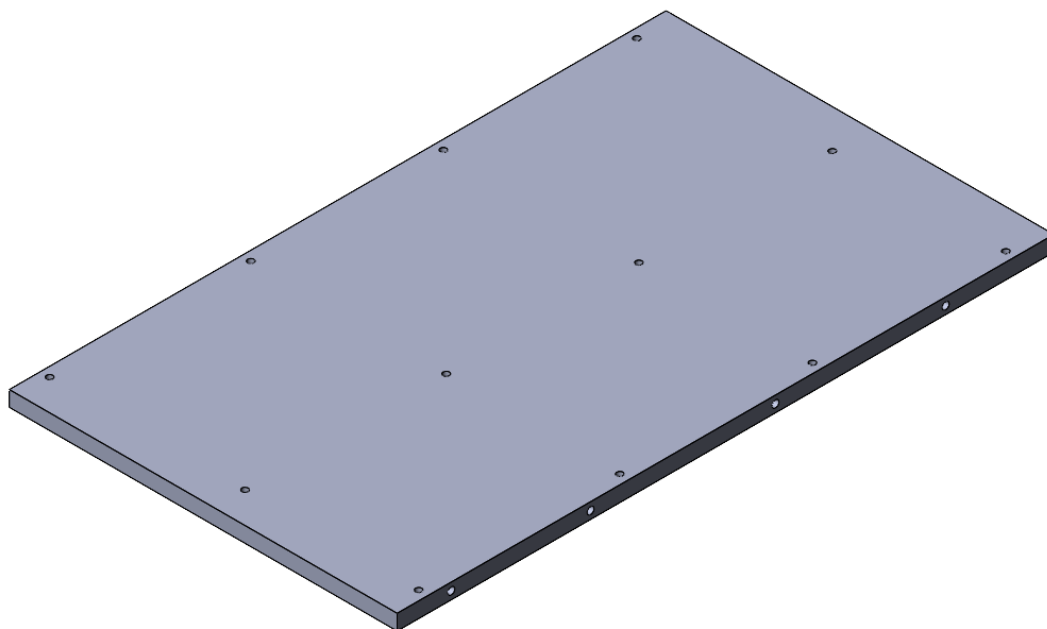


Рисунок 22 – Перегородка ИТПК

Угловая направляющая является съемной и выполнена в виде ступенчатого профиля, ступени которого равнозначны, на одной из поверхностей которых

выполнены отверстия для ее крепления. Направляющая подходит для испытания любого формата спутника от 1U до 12U.

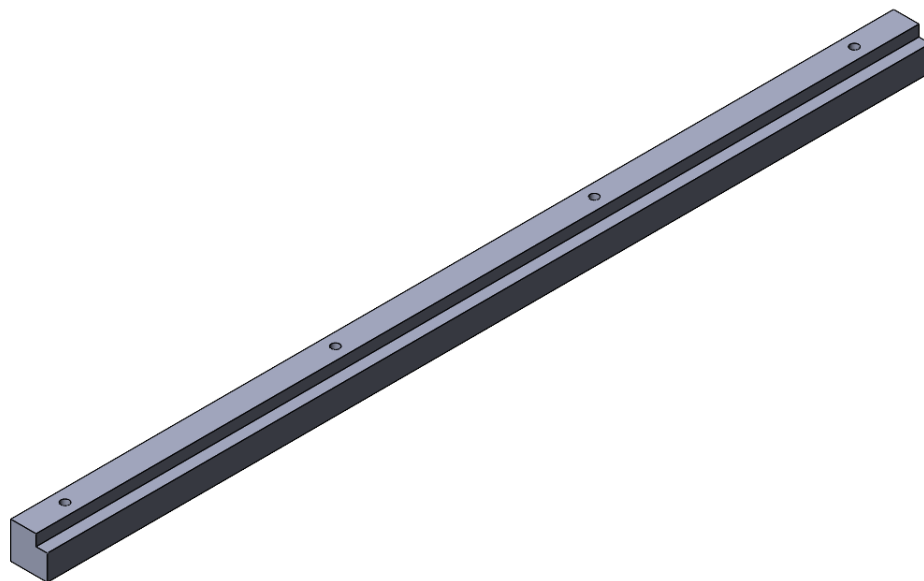


Рисунок 23 – Угловая направляющая ИТПК

Фиксатор направляющих боковой крышки выполнен в виде параллелепипеда с отверстиями для крепления и фиксации шпильки с направляющими.

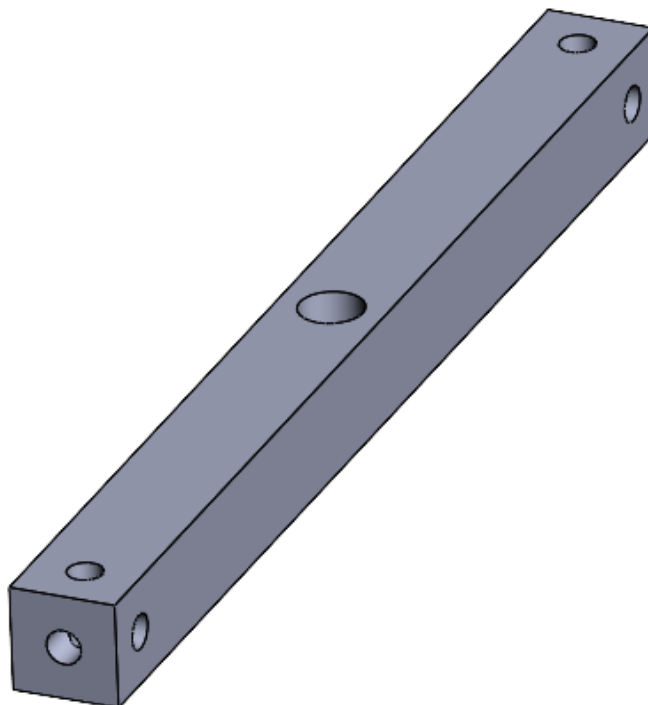


Рисунок 24 – Держатель направляющих передней вертикальной крышки ИТПК

Таким образом, было спроектировано устройство представленное на рисунке 25, состоящее из основания 1 в виде плиты с отверстиями, которая является частью его корпуса, состоящего также из вертикальных боковых стенок из швеллера 2 с угловыми направляющими 3 удерживающими корпус спутника CubeSat 12U внутри ИТПК, пружин толкателя 4, закрепленных на вертикальной стенке из швеллера 5, создающих давление на спутник через толкатель 6. Вертикальные боковые стенки 2 корпуса ИТПК имеют окна 7, предназначенные для доступа к элементам спутника установленного внутрь ИТПК. Верхняя крышка 8 корпуса ИТПК имеет окна 9, предназначенные для установки датчика виброметра и других приборов на корпус тестируемого спутника при вибродинамических испытаниях. В состав корпуса ИТПК могут входить: перегородка из листового металла 10 с угловыми направляющими 3 для установки и испытания спутников CubeSat 6U и 3U, проставки для испытания спутников CubeSat 1U и 2U соответственно. Фиксируются тестируемые спутники внутри ИТПК съемной фиксирующей вертикальной крышкой 11 из швеллера с цилиндрическими направляющими 12, которые вводят в пазы держателей цилиндрических направляющих 13. Крышка 11 фиксируется гайками 14 накручиваемыми на шпильки 15 в процессе установки спутника. Помимо этого, дополнительная фиксация вертикальной крышки 14 осуществляется её прикручиванием винтами с потайной головкой 16 к верхней крышке 8 и к основанию 1.

Устройство используется следующим образом. ИТПК закрепляется на рабочем столе вибростенда путем прикручивания его основания к поверхности стола. Далее задается нужная внутренняя конфигурация ИТПК в зависимости от того какой по формату спутник стандарта CubeSat необходимо загрузить и протестировать. Затем по угловым направляющим устройства спутник устанавливается внутрь ИТПК и фиксируется в нем съемной вертикальной крышкой с цилиндрическими направляющими, удерживаемой на этапе установки гайками на шпильках, а затем дополнительно фиксируемой болтами, прикручиваемыми к основанию и верхней крышке. После этого через имеющиеся в верхней крышке ИТПК окна к тестируемому спутнику подключаются датчики виброметра,

запускается вибростенд и проводятся вибродинамические испытания. При необходимости через окна верхней крышки могут подключаться датчики других измерительных приборов.

Технический результат спроектированного ИТПК заключается в том, что имитатор транспортно-пускового контейнера позволяет протестировать спутники стандарта CubeSat в широком диапазоне форматов от 1U до 12U, при этом само устройство легко адаптируется к рабочему столу вибростендов различных производителей за счет использования в его основании отверстий разного диаметра расположенных на расстояниях выдержанных в метрических и дюймовых диапазонах, в ИТПК предусмотрена возможность подключения датчиков измерительных приборов к спутникам через окна верхней крышки, а установка съемной фиксирующей вертикальной крышки возможна без ее перекоса.

Главными размерами, которых придерживались при проектировании были внутренние размеры для спутника. Соблюдены размеры для использования спутников конфигурации от 1U до 12U. Добиться этого стало благодаря съемным направляющим и перегородке.

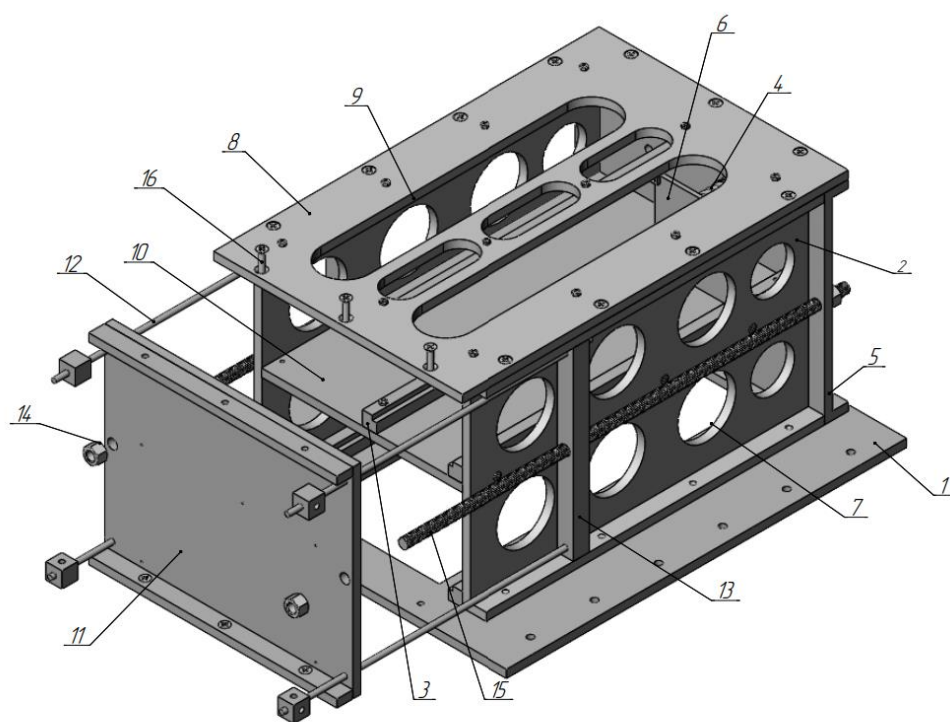


Рисунок 25 – Вид спроектированного ИТПК

При тестировании спутников формата 1U и 2U используются проставки (см рис.26).

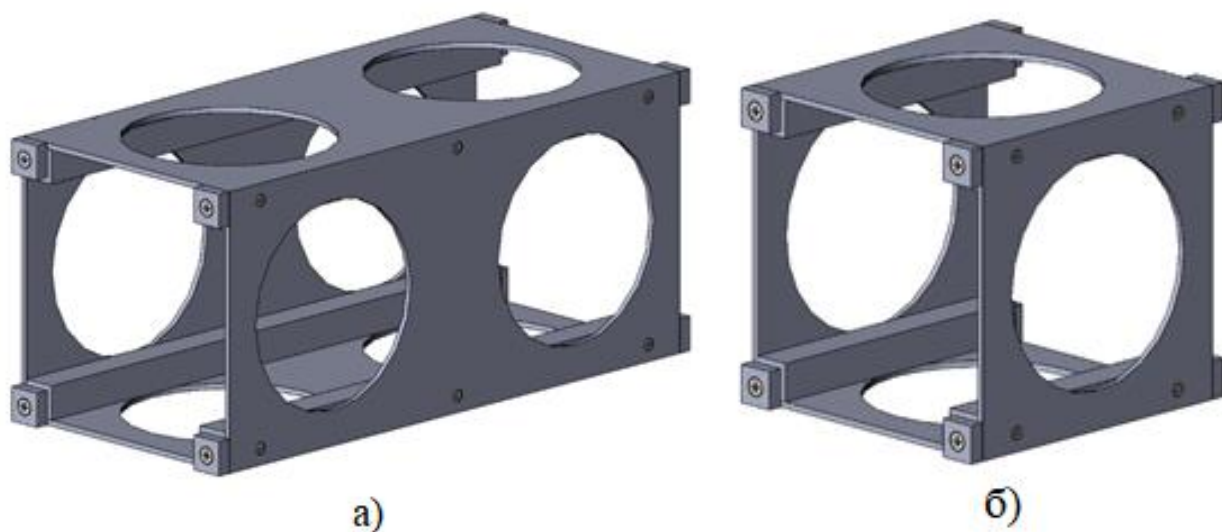


Рисунок 26 – Проставки, используемые при тестировании CubeSat 1U(а) и 2U(б)

Перед тем как приступить к изготовлению ИТПК был проведен частотный анализ собственных частот. Собственные частоты конструкции – это частоты, на которых конструкция сама будет колебаться после отклонения от положения равновесия, при этом они являются незатухающими, т.е. демпфирование системы отсутствует.

Необходимость в расчете собственных частот возникла чтобы убедиться в малой вероятности возникновения в условиях эксплуатации такого механического явления, как резонанс. Как известно, суть резонанса заключается в значительном усилении амплитуд вынужденных колебаний на определенных частотах внешних воздействий – так называемых резонансных частотах. Возникновение резонанса является нежелательным в плане обеспечения надежности изделия явлением, что может стать основной причиной выхода из строя конструкции.[12]

Представим уравнение линейной динамики:

$$M \frac{d^2U}{dt^2} + C \frac{dU}{dt} + KU = R(t). \quad (1)$$



По определению собственной частоты отсутствует демпфирование системы и нагрузка, то уравнение (1) принимает вид:

$$M \frac{d^2U}{dt^2} + KU = 0. \quad (2)$$

Решение представляется в гармоническом виде:

$$U = U_0 \sin(\omega t) \quad (3)$$

Подставляя уравнение (3) в уравнение (2), получаем:

$$[K - \omega^2 M] = 0 \quad (4)$$

Выводим  $\omega$  и получаем зависимость собственной частоты от жесткости конструкции и ее массы:

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (5)$$

Формула (5) объясняет то, чем больше жесткость конструкции, тем больше её частота больше и чем больше масса, тем меньше собственная частота.

Само вычисление собственных частот ИТПК был проведен в САПР SolidWorks. Ограничения были по диапазону используемых частот предъявляемыми госкорпорации «Роскосмос» для допуска спутника к запуску (таблица 5).

Таблица 5 – Диапазон частот для проведения вибродинамических испытаний КА при транспортировке РН Союз-2.1б

Режим		Частота f, Гц					
		20-50	50-100	100-200	200-500	500-1000	1000-2000
(А)	Спектральная плотность ускорения g <sup>2</sup> /Гц	0,01	0,01	0,01-0,025	0,025	0,025-0,0125	0,0125-0,065
	Длительность воздействия, с	60					
(Б)	Спектральная плотность ускорения g <sup>2</sup> /Гц	0,01	0,01	0,01	0,01-0,004	0,004-0,002	0,002-0,001
	Длительность воздействия, с	240					

Результаты проведённого анализа на собственные частоты ИТПК представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты проведения частотного анализа ИТПК

Режим №.	Частота (Герц)	Направление X	Направление Y	Направление Z
1	479,49	0,000588	0,023022	1,59E-07
2	793,08	0,0021558	0,1074	0,0018077
3	845,39	0,33358	1,81E-05	2,90E-06
4	914,11	1,45E-05	0,00022764	0,60006
5	942,05	0,13828	0,0015154	4,16E-07
6	1 153,5	0,0014272	0,0029503	2,91E-06
7	1 168,4	7,62E-05	0,00066598	2,01E-05
8	1 190	0,00032594	8,93E-05	0,0011852
9	1 403,4	0,0010383	1,81E-05	5,26E-05
10	1 429,8	6,28E-07	3,58E-10	0,0020331

11	1 600	0,028611	7,95E-05	4,10E-06
12	1 648,1	0,1393	0,00033869	3,20E-06
13	1 801,2	0,0012816	0,00083754	0,00028229
14	1 895,9	0,00057204	0,00014141	0,0087867
15	1 930,6	5,34E-05	0,0011967	0,027599
16	2 049,7	2,82E-05	0,0065741	0,0031146
17	2 100,9	0,00048406	0,0014472	0,00029576
18	2 189,6	1,04E-05	0,00083656	0,00060382

Массовое участие, полученное по каждому направлению оси показывает какие режимы наиболее опасные. В данной таблице необходимо рассматривать направление Y, т.к. вибрации, создаваемые вибростендом ВИКАМ 35/14 вертикальные.

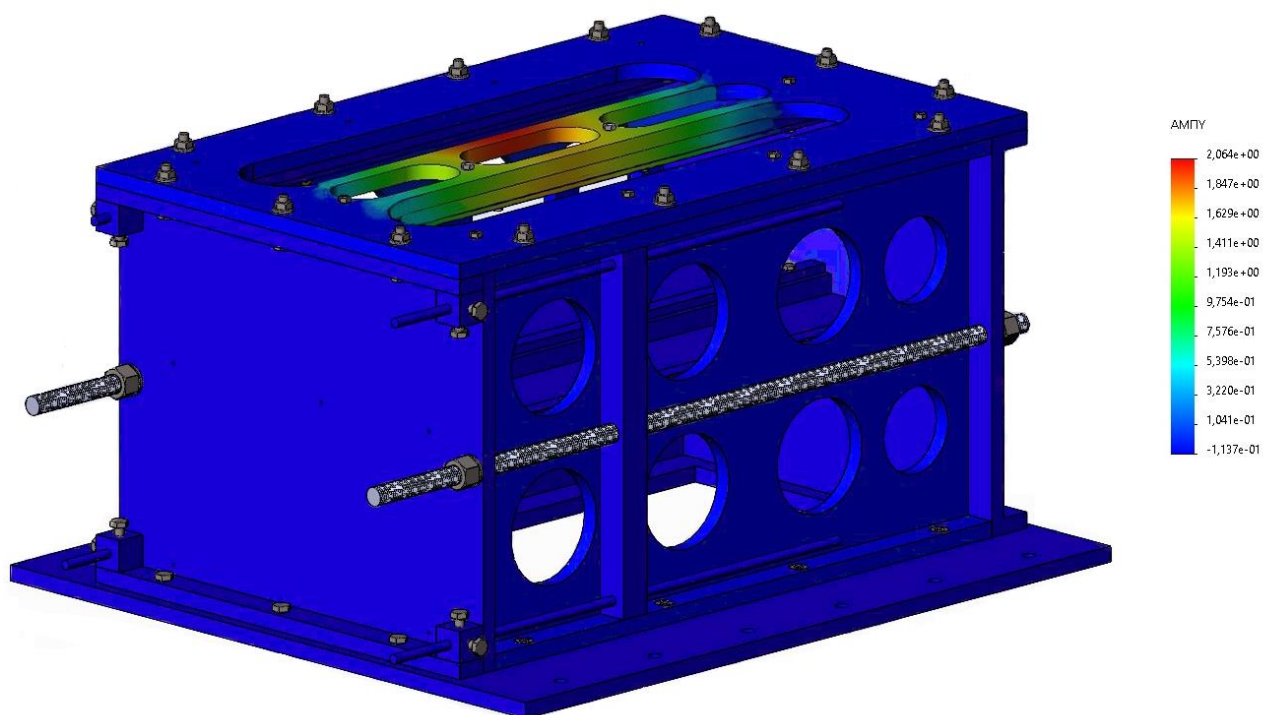


Рисунок 27 – Вид модели для анализа собственных частот ИТПК

Из полученных данных видно, что максимальная задействованная эффективная масса составляет 10% на 2 режиме с частотой 793,08 Гц. Следуя из этого, можно сделать вывод, что на всем диапазоне частот резонанс не наступит.

#### **2.4 Результат изготовления ИТПК**

Для изготовления спроектированного ИТПК применялись станки с числовым программным управлением и использовались следующие технологические операции:

- гибка алюминиевого листа в швеллер;
- фрезерование;
- сверление;
- нарезание резьбы.

Изготовленный ИТПК был установлен на рабочий стол вибростенда ВИКАМ 37/14 в Научно-образовательном центре Амурского государственного университета для проведения вибродинамических испытаний спутников стандарта CubeSat формата от 1U до 12U (см. рисунок 28).

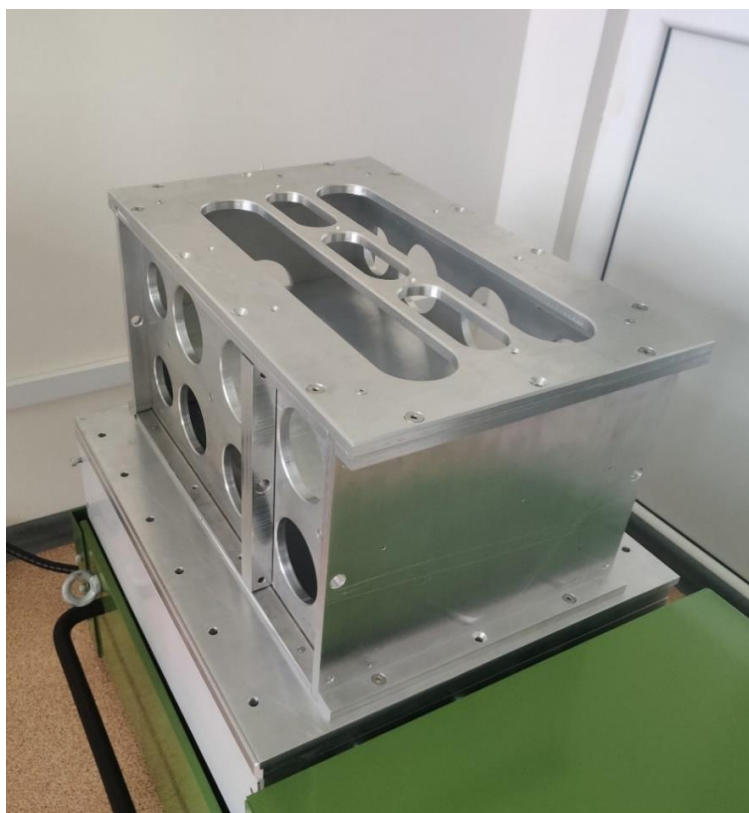


Рисунок 28 – ИТПК установленный на вибростенд ВИКАМ 35/14 в НОЦ

В настоящее время с использованием разработанного ИТПК проводится вибродинамические испытания модели спутника CubeSat 12U.

## 2.5 Операционно-технологическая карта

Операционно-технологическая карта по использованию ИТПК представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Операционно-технологическая карта

Общие технологические требования, требования техники безопасности при проведении вибродинамических испытаний		
№	Содержание перехода	Особые указания
1	К выполнению работы допускаются лица, ознакомленные с техникой пожарной безопасности, технике безопасности при работе с электрооборудование, технике безопасности при работе с вибростендом, прошедшие обучение в соответствии с журналом о технике безопасности для лаборатории, где установлен вибростенд, обладающими практическими навыками и знаниями по работе, аттестованные и сдавшие зачет по эксплуатации оборудования.	
2	При работе с оборудованием нахождение посторонних лиц запрещено.	
3	Перед началом работ провести проверку знаний инструкции по технике безопасности: - мер безопасности при работе с вибростендом; - мер безопасности при работе с электрооборудованием; - мер пожарной безопасности.	Вводный инструктаж – при приеме на работу. Первичный инструктаж – на рабочем месте. Вторичный инструктаж – на рабочем месте. Переодичность проведения 1 раз в год. Внеплановый инструктаж – изменение инструкции и ППБ; изменение технологического процесса, после возникновения пожара; слабые знания; нарушения ППБ.

Порядок подготовки аппаратуры и ПО к тестированию спутника формата CubeSat 12U, регламент выполнения работы.		
1	Получить техническое задание на проведение вибродинамических испытаний и обработку данных.	Необходимо указать массу испытуемого изделия (ИТПК + спутник), частоту работы вибростенда согласно таблице 1, амплитуду перемещения или ускорение. Программное обеспечение рассчитывает необходимый угол эксцентриков, который необходимо установить вручную перед проведением испытаний.
2	Закрепить угловые направляющие в корпусе ИТПК в места, соответствующих тестированию спутника конфигурации 12U.	
3	С соблюдением предосторожности установить спутник формата CubeSat 12U в ИТПК, предварительно убедившись, что там стоит толкатель 12U.	
4	Установить вертикальную крышку с направляющими и шпильками.	
5	Плавными движениями одновременно закручивать гайки на шпильках до упора вертикальной крышки с боковыми вертикальными стенками, зафиксировать в данном положении.	
6	Установить датчик виброметра через отверстие в верхней крышке ИТПК на корпус спутника.	
7	Подключить датчик виброметра к виброметру	
8	Подключить вибростенд к сети, задать необходимые параметры следуя техническому заданию.	Питание 220В. При работе вибростенда, нахождение посторонних лиц запрещено. Контроль возлагается на службу безопасности объекта.
9	Оформить акт проведения вибродинамических испытаний.	

Порядок подготовки аппаратуры и ПО к тестированию спутника формата CubeSat 6U, регламент выполнения работы.		
1	Получить техническое задание на проведение вибродинамических испытаний и обработку данных.	Необходимо указать массу испытуемого изделия (ИТПК + спутник), частоту работы вибростенда согласно таблице 1, амплитуду перемещения или ускорение. Программное обеспечение рассчитывает необходимый угол эксцентриков, который необходимо установить вручную перед проведением испытаний.
2	Установить перегородку к вертикальным боковым стенкам.	
3	Закрепить угловые направляющие в корпусе ИТПК в места, соответствующих тестированию спутника конфигурации 6U.	
4	С соблюдением предосторожности установить спутник формата CubeSat 6U в ИТПК, предварительно убедившись, что там стоит толкатель 6U.	
5	Установить вертикальную крышку с направляющими и шпильками.	
6	Плавными движениями одновременно закручивать гайки на шпильках до упора вертикальной крышки с боковыми вертикальными стенками, зафиксировать в данном положении.	
7	Установить датчик виброметра через отверстие в верхней крышке ИТПК на корпус спутника.	
8	Подключить датчик виброметра к виброметру	
9	Подключить вибростенд к сети, задать необходимые параметры следуя техническому заданию.	Питание 220В. При работе вибростенда, нахождение посторонних лиц запрещено. Контроль возлагается на службу безопасности объекта.

10	Оформить акт проведения вибродинамических испытаний.	
Порядок подготовки аппаратуры и ПО к тестированию спутника формата CubeSat 3U, регламент выполнения работы.		
1	Получить техническое задание на проведение вибродинамических испытаний и обработку данных.	Необходимо указать массу испытуемого изделия (ИТПК + спутник), частоту работы вибростенда согласно таблице 1, амплитуду перемещения или ускорение. Программное обеспечение рассчитывает необходимый угол эксцентриков, который необходимо установить вручную перед проведением испытаний.
2	Установить перегородку к вертикальным боковым стенкам.	
3	Закрепить угловые направляющие в корпусе ИТПК в места, соответствующих тестированию спутника конфигурации 3U.	
4	С соблюдением предосторожности установить спутник формата CubeSat 3U в ИТПК, предварительно убедившись, что там стоит толкатель 3U.	
5	Установить вертикальную крышку с направляющими и шпильками.	
6	Плавными движениями одновременно закручивать гайки на шпильках до упора вертикальной крышки с боковыми вертикальными стенками, зафиксировать в данном положении.	
7	Установить датчик виброметра через отверстие в верхней крышке ИТПК на корпус спутника.	
8	Подключить датчик виброметра к виброметру	
9	Подключить вибростенд к сети, задать необходимые параметры следуя техническому заданию.	Питание 220В. При работе вибростенда, нахождение посторонних лиц



		запрещено. Контроль возлагается на службу безопасности объекта
10	Оформить акт проведения вибродинамических испытаний.	
Порядок подготовки аппаратуры и ПО к тестированию спутника формата CubeSat 2U и 1U, регламент выполнения работы		
1	Получить техническое задание на проведение вибродинамических испытаний и обработку данных.	Необходимо указать массу испытуемого изделия (ИТПК + спутник), частоту работы вибростенда согласно таблице 1, амплитуду перемещения или ускорение. Программное обеспечение рассчитывает необходимый угол эксцентриков, который необходимо установить вручную перед проведением испытаний.
2	Установить перегородку к вертикальным боковым стенкам.	
3	Закрепить угловые направляющие в корпусе ИТПК в места, соответствующих тестированию спутника конфигурации 3U.	
4	С соблюдением предосторожности установить спутник формата CubeSat 2U/1U в ИТПК, предварительно убедившись, что там стоит толкатель 3U.	
5	Установить проставки, используемые при тестировании CubeSat 1U и 2U	Для спутника формата CubeSat 1U рисунок 12 (а). Для спутника формата CubeSat 2U рисунок 12 (б)
6	Установить вертикальную крышку с направляющими и шпильками.	
7	Плавными движениями одновременно закручивать гайки на шпильках до упора вертикальной крышки с боковыми вертикальными стенками, зафиксировать в данном положении.	
8	Установить датчик виброметра через отверстие в верхней крышке ИТПК	

	корпус спутника	
9	Подключить датчик виброметра к виброметру	
10	Подключить вибростенд к сети, задать необходимые параметры следуя техническому заданию.	Питание 220В. При работе вибростенда, нахождение посторонних лиц запрещено. Контроль возлагается на службу безопасности объекта.
11	Оформить акт проведения вибродинамических испытаний.	

Таким образом, в данной главе представлен результат проектирования ИТПК для спутников формата CubeSat 1U-12U с использованием САПР Solid-Works. Были рассмотрены ключевые преимущества материала, из которого был создан ИТПК. В ходе проектирования был изучен и применён метод частотного анализа, который показал, что для спроектированного ИТПК в заданном диапазоне частот резонанс не наступит. Дополнительно была разработана операционно-технологическая карта по использованию ИТПК.

## 3 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Помещения и места работы должны соответствовать ряду правил безопасности и требований для обеспечения безопасных условий труда специалистов.

### 3.1 Требования к системе освещения

Из-за плохого освещения появляется большой шанс получить производственную травму. Виды освещения используемых в производственных помещениях делятся на:

- естественное освещение помещения должно присутствовать там, где постоянно находится рабочий персонал;
- искусственное освещение в большинстве случаев используется в темное время суток;
- локализованное искусственное освещение называется освещение, когда при расположении источников света учитывается размещение рабочих мест;
- совмещенное освещение используется при значимых работах.
- аварийное освещение предназначено для использования в тех случаях, когда происходит внештатная ситуация. [22]

Для плодотворной рабочей деятельности необходимо правильное освещение помещений, которое должно соответствовать требованиям СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение».

Освещенность в помещении не менее 350 лк на уровне 0,8 м от пола, а освещенность рабочих мест – от 350 до 400 лк. [13]

### 3.2 Требования к температурно-влажностному режиму в помещении

Для комфортной работы, температура окружающей среды должна составлять от плюс 23°C до плюс 25°C летом, зимой от плюс 22°C до плюс 24°C, с относительной влажностью воздуха в помещении до 80% при плюс 20°C, с атмосферным давлением  $760 \pm 25$  мм рт.ст..

При работе в условиях высокой температуры, у человека начинается активное потоотделение, что приводит к обезвоживанию организма. Учащается частота сердечных сокращений, что влияет на нормальное функционирование

других органов и систем. Это приводит к ослаблению внимания, ухудшается координация движения, замедляется реакция и т.д. [23]

При работе в условиях низкой температуры, у человека наблюдается сужение сосудов пальцев рук и ног, кожи лица, изменение обмена веществ. При длительном пребывании в условиях низкой температуры без спец. одежды, может привести к заболеванию и воспалению органов.[23]

Запыленность воздуха в помещении, где всегда находится рабочий персонал, не должна превышать более  $2\text{мг/м}^3$ . Для этого система вентиляций должна обеспечивать не менее чем двадцати четырёхкратный воздухообмен за время рабочего дня.

Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха в помещении должно соответствовать требованиям СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование».[14]

### **3.3 Требования охраны труда при работе с вибростендом**

Перед началом работы с вибростендом необходимо надеть спецодежду. Проверить наличие и исправность:

- токоведущих частей электроаппаратуры (выключателей, рубильников);
- ручного инструмента;
- изоляции наружной электропроводки вибростенда;
- освещение рабочей зоны.

В случае обнаружения нарушений требований охраны труда, которые не могут быть устранены собственными силами, специалисту следует сообщить об этом непосредственному руководителю. Не приступать к работе до устранения выявленных нарушений.

Требования охраны труда во время работы вибростенда:

- работать только исправным инструментом;
- установку и снятие деталей производить только после отключения вибростенда от электрической сети;
- подключение к электрической сети производить только с помощью электрической вилки;

- жестко закреплять модель с помощью приспособления к столу вибростенда;
- во время работы рабочее место должно поддерживаться в порядке, запрещается допускать загромождения рабочего места;
- запрещается производить снятие, установку, замену деталей (модулей), со стола вибростенда, при включенном, находящимся под напряжением вибростенде;
- запрещается удлинять с помощью каких-либо предметов гаечные ключи для зажима детали (модуля) на рабочем столе вибростенда;
- запрещается применять прокладки для устранения зазора между плоскостями губок ключей и головок болтов или гаек;
- при уходе с рабочего места, при отключении электричества отключить от сети вибростенд, оставлять рабочее место с включенными приборами, вибростенда запрещается.[15]

### **3.4 Основные понятия электробезопасности**

Поскольку вибродинамический стенд, используемый для проведения испытаний, рассматриваемый в данной выпускной квалификационной работе, относится к электромеханическим устройствам с напряжением до 1000В, то необходимо разъяснить правила безопасности при работе с электроприборами, напряжение которых не превышает 1000 В.

Совокупностью технических и организационных действий и мер, которые необходимы для защиты людей от негативного влияния на их организм электрического тока называют электробезопасностью.

Электроустановка – совокупность машин, установок, линий и дополнительного оборудования (в совокупности с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенных для производства, изменения, передачи, распределения электрической энергии и преобразования её в другие виды энергии.

Нарушение целостности изоляционного слоя на токоведущих элементах электроустановки может произойти поражение электрическим током рабочего

персонала, а также это может привести к возникновению пожара. Если угрозу возгорания можно обнаружить и предотвратить на начальной стадии, то угрозу поражения рабочего персонала электрическим током невозможно обнаружить органами чувств человека: зрением, обонянием, слухом.

Большое значение, при использовании электрического оборудования, имеют вопросы защиты рабочего персонала от угрозы поражения электрическим током. [16]

### **3.5 Воздействие электрического тока на организм человека**

При соприкосновении человека с токоведущими частями приводит к несчастным случаям, связанные с опасным воздействием электрического тока на организм человека.

Действие электрического тока на организм человека может быть:

- Тепловым. Электрический ток, проходя через организм человека, выделяет тепло.
- Химическим. При данном воздействии происходит электролиз, т.е. изменение физико-химический состав органических жидкостей, включая кровь.
- Биологическим. Нарушается функция нервной системы и управляемых ею процессов. Приводит к непроизвольным судорожным сокращениям.
- Механическое. Происходит разрыв тканей и растрескивание костей. Это связано с резким сильным сокращением мышц.

Повреждение, вызванное воздействием электрического тока, называется электротравмой. Факторы, воздействующие на исход электротравмы:

1. От величины силы тока зависит общая реакция организма. Чем выше ток, тем сильнее ощущаются последствия контакта с ним. Смертельным считается ток более 100мА. Зависимость характера воздействия тока на организм человека от его величины представлена в таблице 5.

Таблица 8 – Зависимость характера воздействия тока на организм человека от его величины

Ток, мА	Характер воздействия	
	Переменный ток 50-60 Гц	Постоянный ток
0,6-1,5	Начало ощущения, легкое дрожание пальцев	Не ощущается
2-3	Сильное дрожание пальцев рук	Не ощущается
5-7	Судороги в руках	Зуд, ощущение нагрева
8-10	Руки трудно, но еще можно оторвать от электродов. Сильные боли в пальцах, кистях рук и руках	Усиление нагрева
25-50	Руки парализуются немедленно, оторвать от электродов невозможно. Очень сильные боли. Затрудняется дыхание.	Еще большее усиление нагрева. Незначительное сокращение мышц рук
50-80	Паралич дыхания. Начало трепания желудочков сердца	Сильное ощущение нагрева. Сокращение мышц рук. Судороги, затруднение дыхание.
90-100	Паралич дыхания. При длительности 3 сек. И более паралич сердца – остановившееся трепетание желудочков	Паралич дыхания

2. Из-за того, что переменный ток может вызвать судороги и фибрилляцию, он считается намного опаснее, чем постоянный.

3. Каждый человек имеет свой индивидуальный показатель сопротивления, который складывается из сопротивления кожи и внутренних органов, равный от 600 до 1200 Ом.

4. Из закона Ома следует, что чем дольше продолжается контакт с проводником, тем больше снижается сопротивление.

Электротравмы делятся на

- внешние (ожог, металлизация);

- внутренние (электрический удар).

Электрический удар представляет собой общую электротравму, вызванную возбуждением живых тканей организма человека.

В зависимости от исхода поражения электрические удары делятся на четыре степени:

- I – судорожное сокращение мышц без потери сознания;
- II – судорожное сокращение мышц с потерей сознания, но с сохранением дыхания и работой сердца;
- III – потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания (или того и другого вместе);
- IV – клиническая смерть, то есть отсутствие дыхания и кровообращения – переходное состояние от жизни к смерти, наступающее с момента прекращения деятельности сердца и легких. У человека при этом отсутствуют все признаки жизни. Воздействуя на сердце и легкие можно оживить организм. Длительность клинической смерти определяется временем с момента прекращения сердечной деятельности и дыхания до начала гибели клеток коры головного мозга, в большинстве случаев 4-6 мин (редко 7-8 мин.).

Сравнивая по таблице 5 пороговые значения токов, следует, что при равной силе тока, переменный оказывает более сильное влияние на организм. Значит переменный ток более опасен, чем постоянный ток. [17]

### **3.6 Технические меры и средства защиты, обеспечивающие безопасность при работе с электроустановками**

Токоведущие элементы электроустановки должны быть недоступны для случайного прикосновения, а доступным прикосновению открытым и сторонним проводящим частям не следует быть под напряжением, представляющим опасность поражения электрическим током, как в нормальном режиме работы электроустановки, так и при повреждении изоляции.

Для обеспечения безопасной эксплуатации электроустановок используются различные способы защиты. Выполняют защиту от прямого прикосновения – защиту для предотвращения прикосновения к токоведущим частям



(находящимся под напряжением) и защиту при косвенном прикосновении – защиту от поражения электрическим током при прикосновении к открытым токоведущим частям, оказавшимся под напряжением при повреждении изоляции.

Для защиты от прямого прикосновения применяют следующие меры:

- основная изоляция токоведущих частей;
- ограждения и оболочки;
- установка барьеров;
- размещение вне зоны досягаемости;
- применение сверхнизкого (малого) напряжения.

Защиту от косвенного прикосновения обеспечивают с помощью:

- защитного заземления;
- автоматического отключения питания;
- уравнивания потенциалов;
- выравнивания потенциалов;
- двойной или усиленной изоляции;
- сверхнизкого (малого) напряжения;
- защитного электрического разделения цепей;
- изолирующих (непроводящих) помещений, зон, площадок.

Также необходимо добавить средства защиты от воздействия электрического тока на человека. Средство защиты используется для предотвращения или снижения воздействия на работающего опасных и вредных производственных факторов.[18]

В данной главе были описаны требования к системе освещения, а также рассмотрена её классификация. Было установлено, что для комфортной работы необходимо соблюдать температурно-влажностный режим. Также представлены требования охраны труда при работе с вибростендом. Исходя из вышеописанного, при работе с испытательным оборудованием крайне важно соблюдать предложенные меры электробезопасности, поскольку речь идет о человеческой жизни. Попадание под действие электрического тока, в случае несоблюдения рассмотренных правил, может привести к необратимым последствиям для

здоровья человека. Соблюдение указанных мер является обязательным, требует постоянного и надлежащего контроля.

#### 4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

В данной главе будет проведена экономическая составляющая выпускной квалификационной работы, именно расчет себестоимости разработанного универсального имитатора транспортно-пускового контейнера и проведения вибродинамических испытаний.

##### 4.1 Материалы, комплектующие и услуги по изготовлению

Материалы, комплектующие и услуги по изготовлению ИТПК в их стоимостном отношении были заключены в таблицу 9 для последующего расчета и определения окончательной стоимости устройства.

Таблица 9 – Затраты на материалы и комплектующие.

№	Наименование товара	Количество	Сумма, руб.
1	Пруток квадратный алюминиевый Д16 2м	1	2767,50
2	Алюминиевый лист АМг2М 1000х2000	1	90150,00
3	Бокс АД31Т1 100х100х2 2м	1	9680,00
4	Шпилька резьбовая М12х1000	4	560,00
5	Винт с потайной головкой:		
6	М6х15	32	992,00
7	М4х20	16	32,00
8	М6х30	16	40,00
9	М6х15	16	496,00
10	М3х15	8	8,00
	Болт:		
11	М8х20	12	31,20
12	М5х10	16	80,00
13	М4х20	16	28,80
14	М6х30	12	30,00
15	М6х20	6	12,20
16	М4х25	16	40,00
17	М4х40	32	160,00
	Гайка:		
18	М8	12	22,80
19	М6	28	56,00
20	М3	8	9,60
21	М4	32	16,00
Итого:			146772,10

Для производства ИТПК были заказаны услуги по гибке алюминиевого листа, стоимость которой равна 29560 рублей. Помимо этого, были заказаны услуги по сверлению, фрезерованию и нарезанию резьбы, стоимость данной услуги составила 65000 рублей.

#### 4.2 Основная заработная плата

Экономический расчет также необходимо провести в отношении зарплаты сотрудников задействованных при изготовлении ИТПК. Научный руководитель работает по 5-дневной недели. И каждый день работает 8 часов. Количество часов работы научного руководителя за месяц получается:

$$T_m = 4 \cdot 5 \cdot 8 = 120(\text{ч.})$$

Месячный оклад научного руководителя (доцент, канд. физ.-мат. Наук) определяется:

$$Z_m = Z_b \cdot k_p = 15000 \cdot 1,2 = 18000(\text{руб.}) \quad (6)$$

где  $Z_b$  – базовый оклад равный 15000(руб.);

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,2 (для Благовещенска).

За час работы научный руководитель получает:

$$Z_{\text{ч}} = \frac{Z_m}{T_m} = \frac{18000}{120} = 150(\text{руб.}) \quad (7)$$

При выполнении работы трудоемкость научного руководителя составляет 30 часов в месяц и 360 часов в год. Исходя из этого, основная заработная плата научного руководителя в год определяется:

$$Z_{\text{осн(рук.)}} = 150 \cdot 30 \cdot 12 = 54000(\text{руб.})$$

Аналогично определяется основная заработная плата работника Амурского ЦУП, который имеет месячный оклад 10000 руб. (инженер):

$$Z_{\text{осн(раб.)}} = 36000(\text{руб.})$$

Суммарная основная заработная плата в год определяется:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{осн(рук.)}} + Z_{\text{осн(раб.)}} = 36000 + 54000 = 90000(\text{руб.}) \quad (8)$$

Все затраты разгруппированы по пунктам и представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Общая сумма затрат

Пункты затрат	Сумма, руб.
1 Затраты на материалы и комплектующие	146772,10
2 Затраты на услуги	65000,00
3 Основная заработная плата	90000,00
Итого	301772,10

Анализ экономической составляющей ВКР показывает, что использование ИТПК для тестирования спутника на вибрационные нагрузки позволит существенно сэкономить на проведении испытаний, поскольку спроектированный ИТПК выполнен из общедоступного прокатного материала и предоставляет возможность испытывать спутники формата CubeSat любой конфигурации. Общая сумма затрат на создание и использование ИТПК составила 301772,10 рублей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе были проанализированы существующие патенты на ТПК за последние 5 лет, находящиеся в открытом доступе Роспатента. Изучены характеристики хорошо известных вибростендов, а также представлены принципы проведения вибродинамических испытаний. Из предложенных САПР используемых в Амурском государственном университете, для решения поставленных задач был выбран САПР SolidWorks. Спроектирован ИТПК. По завершению проектных работ была разработана операционно-технологическая карта по использованию ИТПК. Также, в работе представлены предложения по безопасности, на основе нормативных документов по обеспечению требований для создания безопасных условий труда специалистов занятых на вибродинамических испытаниях.

На основе анализа результатов выполнения ВКР можно сделать следующие выводы:

1. Был спроектирован универсальный имитатор транспортно-пускового контейнера для проведения вибродинамических испытаний спутников формата CubeSat от 1U до 12U.
2. Проведенный частотный анализ спроектированного ИТПК показал отсутствие у него резонанса в заданном диапазоне частот.
3. Экономический расчет затрат на изготовление спроектированного ИТПК показал низкую стоимость изделия.

Таким образом, цель данной выпускной квалификационной работы достигнута.

## ПРИМЕЧАНИЕ

Апробация выпускной квалификационной работы:

- конференция «День науки – 2021» Амурского государственного университета;

- конкурс «Дальневосточный старт - 2021» на базе ДВФУ (финалист конкурса по результатам отбора идей проектов).

Представленный в данной ВКР проект послужил основой для оформления заявки на изобретение универсального ИТПК в Роспатент, зарегистрированной 22.03.2021 под №2021107504. Данная заявка на момент написания ВКР находится на этапе экспертизы по существу.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Пат. 2658401 Российская Федерация, СПК В64G 1/64. Универсальный транспортно-пусковой контейнер / М.Е. Сивов, В.В. Юдинцев; АО «РКЦ «Прогресс» - №2017108840; Заявл. 16.03.2017; Опубл. 21.06.2017, Бюл. №18.
2. Пат. 2631360 Российская Федерация. Транспортно-пусковой контейнер / М.Г. Трусов, А.А. Кирсанов; АО «РКЦ «Прогресс» - №2016134129; Заявл. 19.08.2016; Опубл. 21.09.2017, Бюл. №27.
3. Пат. 2541617 Российская Федерация, МПК В64G 1/64. Транспортно-пусковой контейнер для запуска пико- и нано-спутников / Б.Ф. Нестеров, В.М. Чмырев; ЗАО «Технологии ГЕОСКАН» - №2013145414; Заявл. 10.10.2013; Опубл. 20.02.2020, Бюл. №15.
4. Транспортно-пусковой контейнер «КосмоЛаб 12U» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://kosmolab.ru/products/cubesat-deployers-series-12u/> дата обращения 12.03.2021
5. Вибростенд для испытаний [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://blms.ru/vibrostand> (Дата обращения: 02.05.2021)
6. Однокомпонентные электромеханические вибростенды IDEX [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.assemrus.ru/equipment/elektromekhanicheskie-vibrostandy/odnokomponentnye-elektromekhanicheskie-vibrostandy/#> (Дата обращения: 02.05.2021)
7. Электромеханические вибростенды транспортной тряски L.A.V. Equipment серии Vivratest [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://the-seuslab.by/p43830824-elektromekhanicheskie-vibrostandy-transportnoj.html> (Дата обращения: 02.05.2021)
8. Электромеханический вибрационный стенд ВИКАМ-35/14 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://technoprism.ru/catalog/proizvodstvo-ispytatelnogo-oborudovaniya/ispytatelnye-stendyvikam/elektromekhanicheskiy-vibratsionnyy-stend-vikam-35/> (Дата обращения: 02.05.2021)



9. Илья Татарников. 3D шагает в массы с AutoCAD 2011 // САПР и Графика. — М.: КомпьютерПресс, 2010. — № 5. — С. 14—18.
10. Слепова С. В., Шахина М. А. Система автоматизированного проектирования «Компас-3D» (мультимедийный курс лекций) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 3—2. С. 207—208.
11. Подробный обзор программы Solid Works [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://junior3d.ru/article/solidworks.html> (Дата обращения: 20.05.2021)
12. Расчет собственных частот и форм колебаний конструкций в среде T-FLEX Анализ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sapr.ru/article/14918> (дата обращения 21.05.2021).
13. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. Естественное и искусственное освещение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/871001026> (дата обращения 21.05.2021).
14. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. Отопление, вентиляция и кондиционирование [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200035579> (дата обращения 21.05.2021).
15. Инструкция по охране труда при работе на вибростенде [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://инструкция-по-охране-труда.рф/при-работе-на-вибростенде.html> (дата обращения 22.05.2021).
16. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/499037306> (дата обращения 24.05.2021).
17. Влияние электрического тока на организм человека [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.elektro.ru/articles/vliyanie-elektricheskogo-toka-na-organizm-cheloveka/> (дата обращения 26.05.2021).

18. Основные меры и средства защиты от поражения электрическим током [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.rosteplo.ru/w/Основные\\_меры\\_и\\_средства\\_защиты\\_от\\_поражения\\_электрическим\\_током](https://www.rosteplo.ru/w/Основные_меры_и_средства_защиты_от_поражения_электрическим_током) (дата обращения 27.05.2021).

19. Энциклопедия по машиностроению [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mash-xxl.info/info/118420/> (дата обращения 21.05.2021)

20. Допуски и посадки. Основные определения [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://razvitie-pu.ru/?page\\_id=6430](http://razvitie-pu.ru/?page_id=6430) (дата обращения 21.05.2021)

21. Спецификация конструкции CubeSat [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dernasherbrezon.com/posts/cubespec> (дата отбращения 05.06.2021)

22. Требования к освещению рабочих мест [Электронный ресурс ]. Режим доступа: [https://svetpro.ru/htm/informations/osvechenie\\_na\\_rabote\\_info15.html](https://svetpro.ru/htm/informations/osvechenie_na_rabote_info15.html) (дата обращения 09.06.2021)

23. Безопасность жизнедеятельности. Температурно-влажностный режим. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.grandars.ru/shkola/bezopasnost-zhiznedeyatelnosti/temperaturno-vlazhnostnyy-rezhim.html> (дата обращения 09.06.2021)