

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 2022

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Проектирование стенда для тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat

Исполнитель
студент группы 817-об

А.А. Комарова
08.06.22г.
(подпись, дата)

А.А. Комарова

Руководитель
доцент, канд. физ.–мат. наук

Д.В. Фомин
08.06.22г.
(подпись, дата)

Д.В. Фомин

Консультант по БЖД
доцент, канд. тех. наук

А.В. Козырь
14.09.22г.
(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль
ассистент кафедры СИТРК

М.А. Аревкин
08.06.22г.
(подпись, дата)

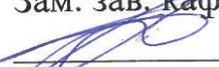
М.А. Аревкин

Благовещенск 2022

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


подпись

И.О.Фамилия

«26» 05 2022г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Комаровой Алены Андреевны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Проектирование стенда для тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat.

учреждена приказом от 05.04.2022 № 679-уч

2. Срок сдачи студентом законченной работы 08.06.2022г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: стандарт спутников CubeSat, патенты на стенды для тепловакуумных испытаний малых космических аппаратов, ГОСТы, справочная литература.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): описание работы стенда и его отдельных компонентов, определение оптимальных размеров элементов стенда, моделирование стенда, выбор конструкционных материалов, расчет основных параметров, экономическая часть, безопасность жизнедеятельности.

5. Перечень материалов приложения: размеры спутника стандарта CubeSat 12U, номограмма для расчета на устойчивость в пределах цилиндрических обечаек, работающих под давлением, габаритные размеры шагового двигателя, патентная грамота.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов): Козырь Аркадий Валентинович, доцент, канд. тех. наук.

7. Дата выдачи задания 26.05.2022г.

Руководитель выпускной квалификационной работы: Фомин Дмитрий Владимирович, доцент, канд. физ.-мат. наук.

Задание принял к исполнению (дата) 26.05.2022г. 

РЕФЕРАТ

Настоящая бакалаврская работа содержит 88 страниц, 25 рисунков, 13 таблиц, 28 источников, 4 приложения.

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, ВАКУУМНАЯ КАМЕРА, НАНОСПУТНИК, CUBESAT, ВАКУУМ, ТЕПЛОВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ, ФЛАНЕЦ, СКОРОСТЬ ОТКАЧКИ, ИНТЕРФЕЙС СВЯЗИ, КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ВАКУУМНЫЙ ВВОД ДВИЖЕНИЯ, ГАЗОВЫЕ НАГРУЗКИ

В работе представлены результаты проектирования стенда для тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat, расчет основных характеристик, а также результаты проведения статического и вибродинамического испытаний в САПР SolidWorks компонентов стенда.

Цель работы – проектирование стенда для тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) Провести анализ условий, в которых функционируют спутники стандарта CubeSat и изучить принцип работы существующих тепловакуумных испытательных устройств;
- 2) Спроектировать в САПР КОМПАС-3D стенд для испытаний спутников формата CubeSat и рассчитать основные характеристики компонентов стенда средствами САПР SolidWorks;
- 3) Провести экономический расчет изготовления и пуско-наладочных работ стенда;
- 4) Описать меры безопасности при работе с вакуумным оборудованием.

СОДЕРЖАНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ.....	7
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	11
1.1 Общие сведения о наноспутниках.....	11
1.2 Условия, в которых функционируют наноспутники.....	12
1.3 Принцип работы вакуумных испытательных стендов.....	14
1.4 Оборудование для проведения тепловакуумных испытаний.....	16
1.5 Конструкционные элементы вакуумных систем.....	20
1.6 Обзор основных САПР, используемых при проектировании технологического оборудования.....	23
1.7 Откачные системы, используемые в вакуумной технике.....	25
2 ПРОЕКТНАЯ ЧАСТЬ.....	29
2.1 Техническое задание.....	29
2.2 Техническое описание спроектированного стенда для тепловакуумных испытаний и его отдельных компонентов.....	30
2.2.1 Описание работы стенда.....	34
2.2.2 Описание работы механизмов для передачи движения.....	35
2.2.3 Описание работы интерфейса связи.....	40
2.2.4 Описание вакуумного уплотнения ввода движения.....	42
2.2.5 Выбор фланцев.....	43
2.3 Расчет времени откачки вакуумной камеры.....	44
2.4 Выбор конструкционных материалов для компонентов спроектированного стенда.....	46
2.4.1 Корпус вакуумной камеры.....	47
2.4.2 Опорно-поворотное устройство.....	47
2.4.3 Теплоизолирующие накладки.....	48
2.5 Расчет габаритных размеров спроектированного стенда	49
2.5.1 Расчет толщины стенок вакуумной камеры.....	50

2.5.2 Расчет размеров фиксирующей корзины.....	58
2.6 Расчет газовой нагрузки.....	61
2.7 Операционно-технологическая карта.....	67
3 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	71
4 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ	77
4.1 Общие требования техники безопасности.....	77
4.2 Средства индивидуальной защиты.....	78
4.3 Требования техники безопасности при работе с вакуумным оборудованием.....	79
4.4 Порядок действий при возникновении аварийных ситуаций.....	81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	83
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	86
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	89

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

КА – космический аппарат;

ТЗ – техническое задание;

МКА – малый космический аппарат;

БА – бортовая аппаратура;

МКЭ – метод конечных элементов;

ИСИ – имитатор солнечного излучения;

ОИ – объект испытаний;

СБ – солнечная батарея;

ТВИ – тепловакуумные испытания;

ТВК – тепловакуумная камера;

ВК – вакуумная камера;

ВУ – вакуумная установка;

ВН – вакуумный насос;

ГВ – газовыделение;

ВС – вакуумная система;

ПС – пропускная способность;

ПН – полезная нагрузка;

РН – ракета-носитель.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение космического пространства является одним из приоритетных направлений деятельности человечества. Космические аппараты успешно используются для решения научных и образовательных, гражданских и военных, многих других задач.

Любые КА перед запуском проходят этап предпусковых испытаний, которые проводят для оценки готовности устройства к выполнению своей целевой задачи. Одним из наиболее важных из них являются тепловакуумные испытания, которые проводят на специальных стендах, позволяющих оценить качество и надежность КА для решения ими целевых задач в течение заданного срока эксплуатации.

В космосе отсутствует свободная конвекция и это может привести к выходу из строя электронных компонентов космического аппарата, в связи с проблемой отведения тепла. Создание условий, при которых отсутствует конвективный теплообмен, для проведения испытаний, решается стендами для тепловакуумных испытаний, основным элементом которых является вакуумная камера. Основная функция вакуумных камер – это создание и поддержание вакуума нужного порядка в системе. Внутри камер, как правило, располагается оборудование и средства для проведения экспериментов и испытаний космических аппаратов. К такому оборудованию могут быть отнесены: устройства для нагрева, устройства для охлаждения, измерительные устройства, устройства для обеспечения связи с внешней средой и др. Как правило, вакуумные камеры испытательных стендов оснащены держателями, позволяющими фиксировать КА. Для удобства проведения исследования средствами фиксации можно управлять при помощи различных манипуляторов. Такое решение позволяет перемещать держатель с установленным в него КА внутри испытательной ВК, что особенно важно, например, при испытаниях функционала солнечных батарей.

В настоящее время динамично развивается направление космической техники, связанное с созданием и эксплуатацией спутников нанокласса, как правило изготовленных по стандарту CubeSat. Стоимость таких спутников мала по сравнению с крупными КА, а их группировка может выполнять большинство функций, которые раньше могли выполнять только крупногабаритные аппараты. Спутники нанокласса представляют большой интерес и для высших учебных заведений, так как время на их разработку и изготовление существенно ниже, чем у больших спутников. Данное преимущество дает возможность спроектировать и изготовить такой спутник учащимися за время их обучения. Еще одним достоинством наноспутников является возможность их запуска в качестве попутной полезной нагрузки.

Как и для любых космических аппаратов, перед запуском спутники нанокласса должны проходить наземные испытания, в том числе и тепловакуумные. На сегодняшний день разработка наноспутников является относительно новым направлением для большинства стран. Литературный обзор показал, что стандов, разработанных для тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat, недостаточно, а в некоторых странах они и вовсе отсутствуют.

Исходя из вышесказанного, была поставлена цель: проектирование станда для тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1) Провести анализ условий, в которых функционируют спутники стандарта CubeSat и изучить принцип работы существующих тепловакуумных испытательных устройств.

2) Спроектировать в САПР КОМПАС-3D стенд для испытаний спутников формата CubeSat и рассчитать основные характеристики элементов станда средствами САПР SolidWorks.

3) Описать меры безопасности при проведении работ с тепловакуумной техникой.

4) Провести экономический расчет проектирования и изготовления спроектированного стенда.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Общие сведения о наноспутниках

Космическими аппаратами называют технические устройства, предназначенные для функционирования в космическом пространстве с целью решения научных, образовательных и других задач [2].

По массе КА подразделяются на [3]:

- пикоспутники, масса которых не превышает 1 кг;
- наноспутники, масса которых составляет 1 – 10 кг;
- микроспутники, масса которых составляет 10 – 100 кг;
- малые, масса которых составляет 100 – 1000 кг;
- большие, масса которых свыше 1000 кг.

Среди представленных КА начинают все чаще разрабатываться наноспутники. Спутники стандарта «CubeSat», относящиеся к наноспутникам, дают возможность студентам в течение периода их обучения принимать участие во всех этапах разработки реального КА: начиная с концептуализации, проектирования, изготовления и проведения предстартовых испытаний, заканчивая эксплуатацией уже запущенного на орбиту спутника. Данные КА, такие как представленный на рисунке 1, являются платформой для проведения исследований принципиально новых подходов в сфере космических технологий, способствующей применению инновационных технических решений. [4].

Преимущества спутников формата «CubeSat»:

- простота разработки;
- низкая стоимость;
- быстрое изготовление;
- возможность создания группировок спутников;
- возможность бесплатного запуска по программе «УниверСат», что особенно ценно для учебных заведений;

Недостатки спутников формата «CubeSat»:

- существенные ограничения выполняемых функций;

- сравнительно малый срок эксплуатации;
- отсутствие возможности запуска на высокие орбиты.



Рисунок 1 – Первый спутник Амурского госуниверситета и Дальневосточного федерального округа: CubeSat 3U «АмурСат» («АмГУ-1»)

Несмотря на недостатки, связанные с малыми размерами, преимуществ у таких спутников больше, поэтому с каждым годом число запусков спутников стандарта CubeSat возрастает [20].

1.2 Условия, в которых функционируют наноспутники

Условия работы космических аппаратов, находящегося на орбите, существенно отличаются от земных. Удаленность от Земли влияет на функционирование спутников, так как от этого зависит степень, в которой он может использовать защитный щит Земли – атмосферу [3]. Чем дальше КА от Земли – тем большее воздействие оказывает на него многофакторная космическая среда. На КА воздействуют такие факторы, как глубокий вакуум, космическая радиация, которая изменяет свойства материалов, солнечное излучение, создающее внутренние тепловые потоки, резкие перепады температур [6].

В вакууме у материалов на основе смол и органических соединений вещество с поверхности испаряется и происходит его разложение по всей массе. Для такого материала, как каучук, за год при температуре 463°К в космосе произойдет разложение до 10% массы. Металлы и керамика в большей степени

устойчивы к воздействию вакуума. Характер взаимодействия трущихся поверхностей в вакууме изменяется. Это обусловлено тем, что между поверхностями отсутствует воздушная прослойка, служащая смазкой и изоляцией. В связи с этим возрастает риск самосвариваемости контактирующих поверхностей пар материалов. Решением этой проблемы является использование таких вариантов вакуумной смазки, как дисульфид молибдена и фтористые соединения [7].

Радиационный теплообмен не нуждается в наличии материальной среды между телами. Такой процесс переноса энергии обусловлен превращением части внутренней энергии вещества в энергию излучения, которое переносится в пространстве со скоростью света и поглощается веществом [8].

К источникам радиации относят:

- Солнце;
- радиационные пояса вокруг Земли, представляющие собой области пространства, заполненные заряженными частицами, захваченными магнитным полем Земли [1];
- галактическое космическое излучение (процентный состав: протоны – 0,94, ядра гелия – 0,055, тяжелые ядра – 0,005) [2].

Различают три составляющие радиоизлучения Солнца: радиоизлучение спокойного Солнца (тепловое излучение ионизированной атмосферы Солнца), медленно изменяющееся радиоизлучение (обусловлено появлением на Солнце долгоживущих активных областей), спорадическая компонента радиоизлучения Солнца (относительно быстро меняющееся повышение интенсивности, которое носит характер всплесков) [9].

В условиях космоса имеют место перепады температур, а также отсутствует конвективный теплообмен, что может спровоцировать поломку электронных компонентов КА, в связи с проблемой отведения тепла. На температуру в околоземном пространстве оказывает влияние степень удаленности от Земной поверхности. Например, показания бортового термометра спутника TechEdSat, который вращался на низкой околоземной

орбите колеблются от -4°C до $+45^{\circ}\text{C}$, однако поверхность КА может нагреваться до $+100^{\circ}\text{C}$, и охлаждаться до -160°C [9].

Согласно рассмотренным факторам космического пространства можно сделать следующий вывод: для проведения тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat необходимо обеспечить в ВК температуру, в пределах от $+100^{\circ}\text{C}$ до -160°C .

1.3 Принцип работы вакуумных испытательных стендов

Условия, приближенные к тем, в которых функционируют космические аппараты, можно создать на Земле. Проведение наземных испытаний может определить успех или неудачу космической миссии. Одним из видов создания условий космоса являются тепловакуумные испытания. Задача таких испытаний состоит в том, чтобы осуществлять проверку работы аппаратуры и узлов КА в условиях, имитирующих космические.

Вакуумные испытательные стенды позволяют моделировать различные условия космоса и эффективно тестировать космическую аппаратуру и приборы. Испытания в таких камерах происходит следующим образом: КА помещается внутрь камеры, где подвергается воздействию вакуума, имитаторов солнечного излучения, криогенных экранов и др. Общий вид устройства для проведения тепловакуумных испытаний на Земле представлен в рисунке 2.

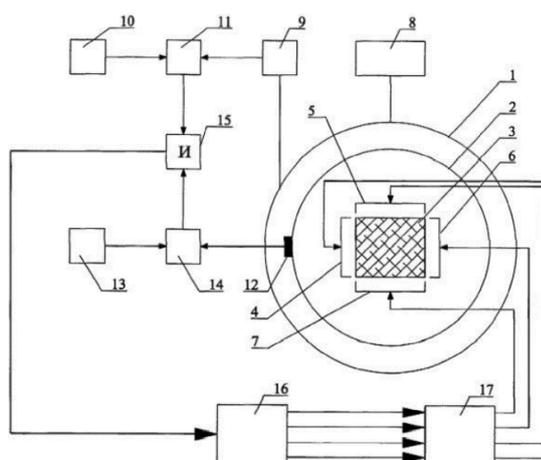


Рисунок 2 – Функциональная схема стенда для проведения тепловакуумных испытаний [8]

Для проведения эксперимента нужно создать в изоляционной полости достаточно высокий вакуум. В таком случае перенос тепла теплопроводностью газа будет практически исключен, что приведет к осуществлению притока тепла из окружающей среды путем излучения [5].

В состав вакуумной системы входят устройства для получения вакуума, и поддержания его на требуемом уровне, измерительных устройств, объемов, подвергаемых откачиванию (вакуумных камер), а также различных трубопроводов.

ВК 1, в которую помещен КА 3, имитирует условия космического пространства, в первую очередь такие как давление, наблюдаемое в космосе, температура и солнечная радиация. Низкие температуры создаются при помощи криогенного экрана 2, охлаждаемого жидким азотом. Солнечное излучение воссоздают секции имитаторов внешнего теплового потока 4-7. Система вакуумирования 8 служит для откачки воздуха из стенда. Также функциональная схема содержит следующие компоненты: 9 – датчик давления; 10 – датчик давления, исключая конвективный теплообмен; 11 – схема сравнения; 12 – датчик температуры; 13 – датчик температуры холодного космоса; 14 – схема сравнения; 15 – схема совпадения; 16 – система управления включением блока регуляторов напряжения; 17 – блок регуляторов напряжения [8].

Для получения вакуума, и поддержания его на требуемом уровне, применяют средства откачки, называемые вакуумными насосами. ВН выполняют функцию удаления газов из вакуумной системы. Их работа заключается в понижении уровня концентрации молекул. Вакуумные насосы уменьшают давление газа до такого уровня, при котором обеспечиваются условия, необходимые для научных исследований.

Средства получения и поддержания вакуума называются средствами откачки, представляющими собой вакуумные насосы, удаляющие или поглощающие газ из вакуумной системы. Работа вакуумных откачных постов заключается в уменьшении молекулярной концентрации, то есть снижения

давления газа до уровня, обеспечивающего проведение физических исследований или вакуумных технологических процессов.

Среди источников газовых нагрузок выделяют следующие[5]:

1) Натекание – это попадание атмосферных газов в вакуумную систему, которое возникает из-за наличия течей. Такое явление обусловлено наличием технологических погрешностей в изготовлении вакуумных оболочек.

2) Газовыделение – это процесс, при котором в объем вакуумной камеры выделяется газ из находящихся внутри нее материалов. Величина газовыделения зависит от свойств материалов, а также их обезгаживания.

Таким образом, рассмотрен принцип работы вакуумных испытательных стендов на примере устройства для проведения тепловакуумных испытаний космических аппаратов.

1.4 Оборудование для проведения тепловакуумных испытаний

Основной частью испытательной системы является вакуумная камера. В неё помещается космический аппарат, после чего он подвергается воздействиям, имитирующим космическое пространство.

Стандартная ВК состоит из следующих компонентов (рисунок 3): корпус 1, фланцев-заглушек 2, фланца 3 со смотровым окном, «быстрыми дверями» 4.

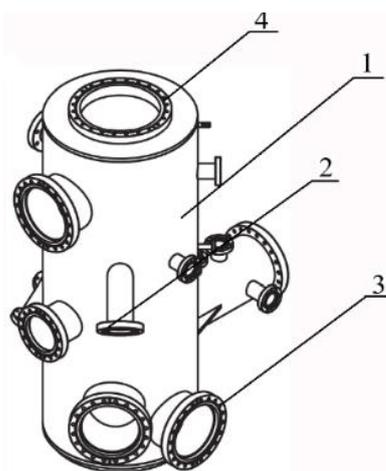


Рисунок 3 – Основные составные части ВК [9]

В промышленности применяют камеры с различными формами корпуса (рисунок 4).

CF соединения (рисунок 5) рассчитаны на условия сверхвысокого вакуума (предельное остаточное давление до $1,33 \times 10^{-11}$ Па, температурный диапазон от -200°C до 450°C) [7].

Для создания быстроразъемных соединений в ВС с остаточным давлением до $1,33 \times 10^{-6}$ Па ($\sim 10^{-8}$ Торр) используются фланцы серии ISO-KF (рисунок 6) [7].

Вакуумные фланцы. Для ВК в основном применяются фланцы серии CONFLAT (рисунок 5). Такие фланцы подходят для сверхвысоковакуумных установок, имеют высокий эффект уплотнения и малую скорость натекания через соединения. Фланцы стандарта CF изготавливают из нержавеющей стали 304 и 316.

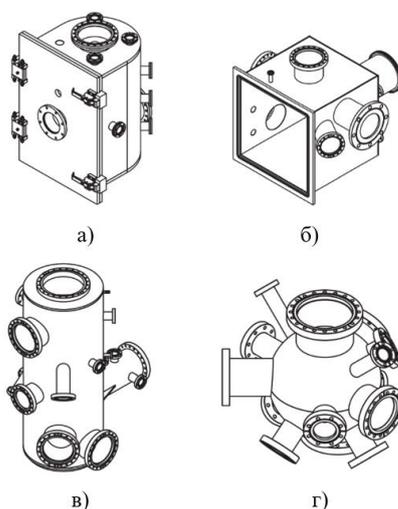


Рисунок 4 – Основные типы корпусов ВК [9]:

- а) типа D; б) коробчатого типа;
- в) цилиндрические; г) сферического типа

Фланцы типа ISO-KF (рисунок 6) являются быстроразъемными и позволяют создать стандартные вакуумные соединения в низком, среднем и высоком вакууме. Материалы, из которых изготавливают фланцы ISO-KF: алюминий и нержавеющая сталь 304 [10].

Вакуумные уплотнители. Уплотнения служат для увеличения герметичности соединений, т.е. для уменьшения протечек воздуха внутрь камеры.



Рисунок 5 – Соединения типа CONFLAT (CF) [7]

Наиболее распространенными материалами, из которых изготавливают уплотнительные кольца, являются витон и нитрил. Для витона свойственна низкая проницаемость по отношению к большинству газов. При недолгом нагреве этот материал выдерживает температуры до 200°C, а при длительном – до 150°C. Недостатком данного материала является низкая хладостойкость. У нитрила меньшая предельная температура – до 120°C и худшая химическая стойкость. Главная особенность этого материала – высокая стойкость к бензину и жидкостям на его основе [10].

Высокую герметичность обеспечивают такие материалы, как перфторированный каучук, витон, этиленпропиленовый каучук, нитрил, эпихлоргидриновый каучук, гидрированный нитрил, неопрен и полиуретан.



Рисунок 6 – Соединения типа ISO-KF [7]

Силикон отличается высокой термостойкостью, хладостойкостью, электрическим сопротивлением. Недостатками силиконовых уплотнительных элементов являются быстрый износ и низкая герметичность [10].

Основные типы уплотнителей:

- центрирующие кольца;
- уплотнительные кольца;
- уплотнительные прокладки.

Монтажные компоненты. В зависимости от конфигурации вакуумной системы для монтажа соединений ISO-KF, могут быть использованы хомуты (шарнирный хомут представлен на рисунке 7) или когтевые зажимы. Материал – алюминиевый сплав.

Когтевые зажимы, или струбины, используются для присоединения фланцев ISO-KF к опорной поверхности фланца большого диаметра.

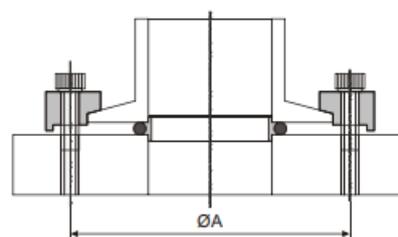
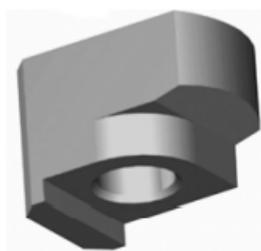


Рисунок 7 – Односторонний когтевой зажим для фланца ISO-KF [10]

Сильфонные соединения. Область применения: монтаж расположенных со сдвигом фланцев и виброизоляция испытательных вакуумных камер от вакуумных откачных постов.

Отличают два вида сильфонов:

- гибкие, или несжимаемые, которые применяют в местах, где необходимо обеспечить изгиб;
- сжимаемые, которые применяют в местах, где требуется обеспечить изгиб и сжатие.

Обзор оборудования для проведения тепловacuумных испытаний позволяет осуществить их выбор в рамках дальнейшего проектирования.

1.5 Конструкционные элементы вакуумных систем

Важным этапом проектирования агрегатов и изделий, применяемых в вакуумной технике, является выбор конструкционных материалов. Такие материалы должны обладать свойствами, необходимыми для корректной работы вакуумной техники.

Для изготовления элементов вакуумного оборудования могут быть применены металлы и их сплавы, тугоплавкие металлы. Примерами металлов, применяемых при изготовлении элементов вакуумных систем являются чугун, нержавеющая сталь, медь. Для изготовления уплотнительных элементов могут быть применены резины, фторопласт. Также часто применяемыми материалами являются керамика, стекло, различные пластмассы, клеи, замазки, и другие [19].

Большая часть элементов вакуумных систем изготавливается именно из металлов и их сплавов [5]. Особенно это относится к корпусам изделий и вакуумных насосов.

На выбор конструкционных материалов влияет требуемый уровень вакуума, рабочий диапазон температур, а также назначение элемента конструкции.

Стали, относящиеся к углеродистым и малоуглеродистым применяют для элементов вакуумных систем, работающих при давлении от $1 \cdot 10^{-4}$ Па и выше. Такие стали не используют при рабочих температурах, которые ниже 173 К [5].

Из сталей, относящихся к коррозионно-стойким, изготавливают системы, работающие при высоком и сверхвысоком вакууме. Примерами являются стали марок 2Х13 и 12Х18Н10Т. Такие стали имеют ряд преимуществ. Во-первых, они эффективно обезгаживаются прогревом и паяются с применением как мягких, так и твердых припоев. Во-вторых, такие стали хорошо поддаются аргонно-дуговыми, а также и электронно-лучевыми типам сварки. Рабочая температура не превышает 1200 К [5].

Из меди часто изготавливают уплотнительные элементы вакуумных систем и коммутирующей аппаратуры, корпуса некоторых криостатов. Главным преимуществом меди является высокая вакуумная плотность, которая

обеспечивается даже при сравнительно небольших толщинах стенок. Также медь обеспечивает высокую тепло- и электропередачу между элементами вакуумных систем. Применяются такие марки меди, как М1 и М3 [5].

Алюминий и различные его сплавы нашел широкое применение в качестве вакуумных уплотнений разборных соединений. При изготовлении уплотнителей используется алюминий марки АД1. Для выполнения сварки необходимо обеспечивать высокую механическую прочность. Таким свойством обладает алюминиевый сплав АМц, а также АМг-6 [5].

Такой сплав, как латунь Л68 и ЛС 59-1, имеет в своем составе летучие примеси, поэтому при изготовлении элементов вакуумной техники применяется редко. В данном сплаве, когда латунь нагревается, происходит испарение цинка. В свою очередь испарение цинка приводит к загрязнению поверхностей вакуумной техники. При таком процессе латунь становится пористым материалом [5].

Для процесса пайки стекла с металлом используют ковар. Коэффициент теплового расширения этого сплава сравним с коэффициентами теплового расширения стекол, равен 10^{-7} K^{-1} [5].

Для изготовления вакуумного оборудования применяют и неметаллические материалы.

Применения стекол связано с тем, что они прозрачны и дают возможность, например, вести визуальный контроль показателей датчиков. Также возможен контроль за тем, что происходит внутри вакуумных камер посредством фланцев, содержащих смотровое стекло. Более того, стекла обеспечивают хорошую электроизоляцию и легко обезгаживаются [5].

Для изготовления тоководов, выдерживающих высокое напряжение используется керамика. Такой материал применяется в сверхвысоковакуумных системах [5].

Из вакуумных резин часто изготавливают различные уплотнительные элементы разъемных соединений. Недостатком резин является отсутствие возможности применения при высоких температурах. Это связано с тем, что при

нагревании изделий, выполненных из резины, происходит сильное газовыделение [5].

Такой материал, как фторопласт-4 можно использовать при температурах в пределах 77 - 520 К. Фторопласт-4 обладает малым газовыделением, которое в десятки раз меньше, чем у вакуумной резины. Еще одним достоинством является стойкость при контакте с химически активными веществами. По стойкости фторопласта выше, чем стойкость золота и платины. Недостатком фторопласта-4 является сравнительно низкая упругость. Высока величина остаточной деформации, а также текучести [5].

При изготовлении вакуумных систем часто используют нержавеющую сталь 12Х18Н10Т. Для этой стали характерны кислотостойкость, а также немагнитность. Данная сталь обладает хорошей свариваемостью, а также отлично паяется с применением специальных флюсов. Нержавеющие стали марки 12Х21Н5Т и 12Х17Г9АН4 в нагартованном состоянии обладают более высокими показателями прочности, чем сталь 12Х18Н10Т и как правило применяются при изготовлении сильно нагруженных деталей, таких как болты и шпильки. Сталь марки Н36ХТЮ способна сохранять упругие свойства при нагреве до 600 °С. Область применения такой стали – изготовление пружинных компенсаторов в фланцевых соединениях. Основные свойства и состав указанных сталей представлены в таблице 1 [19].

Сталь 12Х18Н10Т используется также в криогенной сфере при температурах -270°С.

Таблица 1 – Нержавеющие стали, применяемые в вакуумной технике [19]

Марки сталей	σ _{ВР} , МПа	σ _Т , МПа	Состав, %							
			С	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Fe	N ₂
12Х18Н10Т	540	200	0,12	0,8	1,5	18	10	0,7	Основа	–
1Х21Н5Т	600	350	0,14	0,8	0,8	21	5,5	0,8	»	–
Х17Г9АН4	700	350	0,12	0,8	9	17	4	–	»	0,2
Н36ХТЮ	750	–	0,05	0,8	0,8	15	35	0,9	»	–

Таким образом, обзор конструкционных материалов и области их применения позволяет осуществить их выбор в рамках дальнейшего проектирования.

1.6 Обзор основных САПР, используемых при проектировании технологического оборудования

Для проектирования стенда для тепловакуумных испытаний в данной работе рассматриваются САПР, лицензии на которые есть в распоряжении Амурского Государственного Университета.

Система трехмерного моделирования КОМПАС-3D.

САПР КОМПАС-3D дает возможность автоматизировать процесс проектирования изделий посредством параметрического моделирования. Данный тип моделирования позволяет управлять взаиморасположением элементов конструкции с автоматическим обновлением полученной модели и редактировать чертежи в процессе внесения изменений в первоначальную модель [22].

Чертежно-графический редактор КОМПАС-ГРАФИК, который встроен в систему, позволяет эффективно выполнять проектно-конструкторские работы. Одной из полезных функций является возможность добавить растровое изображение в графический документ. Также можно выбрать масштаб добавляемого растрового изображения. Инструментами КОМПАС-3D можно сохранять созданный документ в различных форматах, включая формат изображений [22].

Одним из самых главных преимуществ данной САПР является полная поддержка комплекса межгосударственных стандартов ЕСКД. В КОМПАС-ГРАФИК поддерживаются как пользовательские, так и стандартные стили линий и штриховок. Данный САПР включает в себя все типы размеров: линейных, угловых, диаметральных. Есть возможность автоматической простановки допусков, а также есть возможность подобрать квалитеты, исходя из заданных предельных отклонений [22].

Система автоматизированного проектирования AutoCAD.

САПР AutoCAD – это прикладная система для проведения автоматизированных инженерно-графических работ. Данная САПР позволяет моделировать различные типы конструкций в виде 2D- и 3D-чертежей [21].

Компания AutoDesk входит в состав лидирующих производителей САПР, и позволяет использование в качестве бесплатного пробного периода, а также бесплатного пользования в учебных целях. Для других программных комплексов САПР AutoCAD может представляться как графическое ядро, которое служит в качестве первоначального геометрического представления объекта. [21].

САПР AutoCAD и входящие в его состав прикладные опции служат для выполнения следующих инженерно-графических работ:

- инженерно-графическое моделирование сложных пространственных объектов и процессов;
- работы с информационными базами данных чертежей;
- работы библиотекой стандартных изделий;
- параметризацию и построение деталей и чертежей с заданными отличительными характеристиками на основе ранее созданного чертежа [21].

САПР AutoCAD позволяет выполнять большинство из существующих видов инженерно-графических работ, присутствующих в областях инженерного проектирования, таких как разработка:

- электрических систем;
- радиоэлектронных;
- вычислительных систем.

Система удобна для изучения и построения чертежей разного уровня сложности [21].

САПР SolidWorks.

Главной задачей САПР SolidWorks является автоматизация работ, проводимых на производственных предприятиях, при разработке конструкторской и технологической документации. При моделировании можно получить детали и конструкции любого назначения, а также любой степени сложности.

В САПР SolidWorks применяется принцип параметрического проектирования объемных твердотельных деталей. При работе можно моделировать различные детали и сборки, которые впоследствии можно перенести на двухмерные чертежи. Спецификации по сборочным чертежам составляются согласно требованиям ЕСКД.

Наиболее интересными инструментами САПР SolidWorks являются прикладные модули, в которых можно проводить различные испытания деталей и сборок. Одним из таких модулей является SolidWorks Simulation. Этот модуль базируется на МКЭ, и дает возможность проведения расчетов на прочность деталей и сборок. С помощью данного модуля возможно проводить оптимизацию конструкции, избегая излишних затрат на материалы. По результатам проводимых испытаний можно получить модель более прочной конструкции, облегчить ее, обеспечить экономическую выгоду и практичность построенной детали[21].

Исходя из анализа САПР имеющихся на базе Амурского Государственного университета, для построения 2D чертежей была выбрана автоматическая система проектирования КОМПАС-3D, так как данная САПР поддерживает все стандарты ЕСКД, и для построения двухмерных чертежей является наиболее удобной.

Для построения 3D модели устройства была выбрана САПР SolidWorks, так как в ней удобно проводить испытания конструкции средствами прикладных модулей.

1.7 Откачные системы, используемые в вакуумной технике

Основным фактором для выбора вакуумного откачного поста является получение требуемого уровня вакуума.

Были рассмотрены безмаслянные вакуумные откачные посты, подходящие для создания в испытательной ВК давления, равного 10^{-5} Па, и обладающие набором фланцев, подходящих для спроектированного стенда.

К числу высоковакуумных и сверхвысоковакуумных насосов относят турбомолекулярные насосы и крионасосы.

Турбомолекулярные вакуумные насосы, такие как на рисунке 20, применяют для создания в испытательной камере давлений до $10^{-8} \dots 10^{-10}$ Па.

Преимуществом таких насосов является возможность производить откачку до требуемого давления без проникновения паров углеводородов в полость откачиваемой вакуумной камеры. Данные насосы посты при обслуживании и надежны.

В результате была выбрана отвечающая требованиям проектирования турбонасосная установка HiCube 80 Eсо, так как она позволяет получить требуемое давление, а также обладает сравнительно большим межсервисным интервалом, который составляет 4 года.

Общий вид откачного поста представлен на рисунке 8.

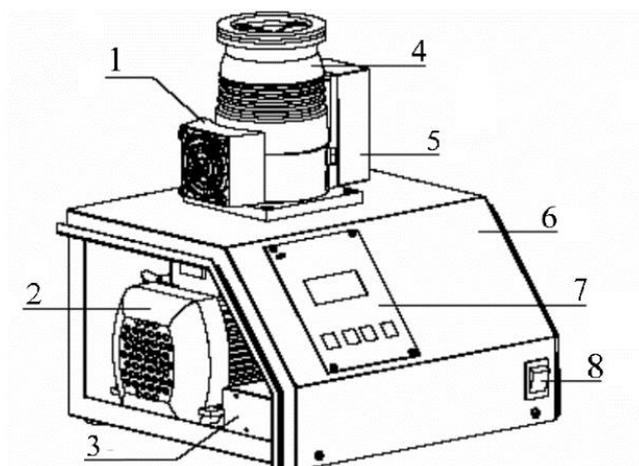


Рисунок 8 – Вид откачного поста HiCube 80 Eсо [26]:

1 – Установка охлаждения воздуха, 2 – Блок питания: диафрагменный насос MVP 015-2, 3 – Блок питания TPS 110, 4 – Турбонасос HiPace 80, 5 – Электронный приводной агрегат TC 110, 6 – Кожух, 7 – Блок отображения и управления DCU 002, 8 – Вводный выключатель.

Основные характеристики модификаций откачного поста HiCube 80 Eсо указаны в таблице 2. Из трех модификаций, представленных в таблице 2, была выбрана модификация, включающая в себя фланец всасывания DN 63 CF, так как она обеспечивает высокий уровень герметичности, и имеет более высокое предельное разряжение.

Турбонасосные установки, входящие в состав серии HiCube представляют собой полностью автоматизированные насосные агрегаты, которые готовы к подключению[26].

Турбонасосная установка HiCube 80 Eco состоит из мобильного вакуумного насосного агрегата, включающего турбонасос, а также специально подобранный форвакуумный насос[26]. Также в состав поста входит система для осуществления управления и электропитания.

Для данного откачного поста характерны высокая скорость откачки и воздушного охлаждения.

Таблица 2 – Основные характеристики откачного поста HiCube 80 Eco [26]

Параметр	Значение		
	Фланец всасывания	DN 40 ISO-KF	DN 63 ISO-KF
Турбомолекулярный насос	HiPace 80		
Скорость высоковакуумной откачки, л/с	35	67	67
Форвакуумный насос	MVP 015-2 DC / MVP 015-4 DC / MVP 030-3 DC		
Скорость форвакуумной откачки м3/ч	1 / 0,75 / 1,8		
Предельное разрежение, мбар	<10 ⁻⁷	<10 ⁻⁷	<10 ⁻¹⁰
Тип охлаждения	воздушное		
Питание	1ф 220-240 В		
Вес, кг	17		

Таким образом, в данной главе были рассмотрены:

- теоретические сведения о наноспутниках;
- теоретические сведения о факторах космического пространства, знания о которых необходимы для понимания условий, в которых функционируют наноспутники;
- принципы работы тепловакуумных испытательных стендов, их состав (вакуумная арматура) и конструкционные материалы;

- основные САПР, используемые при проектировании технологического оборудования, с целью выбора наиболее подходящих из них для построения 2D и 3D чертежей.

2 ПРОЕКТНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Техническое задание

Целью данного раздела является проект стенда для тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat. Стенд должен быть разработан на основе высоковакуумной камеры, позволяющей проводить испытания при давлении, при котором отсутствует конвективный теплообмен (10^{-5} Па), так как это основное условие для вакуумных испытаний.

Спроектированный стенд должен быть универсальным, и позволять размещать внутри испытательной камеры спутники стандарта CubeSat формата от 1U до 12U, следовательно, габаритные размеры вакуумной камеры должны быть рассчитаны с учетом стандартных размеров наноспутников, указанных в Приложении А.

ВК данного стенда должна быть снабжена криогенными экранами для испытаний при различных температурных нагрузках. Диапазон рабочих температур на высотах, на которые запускаются наноспутники, составляет приблизительно от -170°C до $+100^{\circ}\text{C}$.

Фланцы камеры должны быть оснащены источниками, имитирующими солнечный свет, при проверке работоспособности солнечных батарей исследуемого наноспутника. Камеру необходимо оснастить фланцем со смотровым окном, что позволит вести визуальный контроль во время проведения эксперимента, а также фланцем для подключения гофры откачного поста.

Необходимо обеспечить фиксацию, а также линейное и вращательное перемещение спутника внутри испытательной ВК. Это нужно для того, чтобы подвергать испытываемый спутник равномерному воздействию имитаторов условий космического пространства. При этом необходимо обеспечить достаточную герметичность соединений ввода движения, для того, чтобы не допустить натеканий атмосферного воздуха. Ввод движения должен обеспечивать передачу внутрь камеры как линейное, так и вращательное перемещение при требуемом давлении (10^{-5} Па) внутри вакуумной камеры.

Со спутником, находящимся внутри ВК, необходимо обеспечить постоянную связь в отсутствие возможности включения радиопередающего устройства, т.к. оно будет экранировано стенкой камеры.

Необходимо обеспечить теплоизоляцию КА, которая позволит избежать передачи тепла от исследуемого объекта к элементам конструкции фиксирующего спутник устройства. При соблюдении этого условия будет существенно повышаться качество проводимого эксперимента.

2.2 Техническое описание спроектированного стенда для тепловакуумных испытаний и его компонентов

На основе представленного выше ТЗ был спроектирован стенд для тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat форматом от 1U до 12U. Данный стенд предназначен для проведения испытаний в условиях, максимально приближенных к натурным. Обеспечена возможность постоянной двусторонней связи с космическим аппаратом в ВК, для осуществления автоматического контроля над перемещением наноспутника, информационного взаимодействия с ним и приема телеметрии. Обеспечена возможность визуального контроля над испытываемым наноспутником. Качество проводимых испытаний увеличивается посредством упрощенной процедурой установки испытываемого спутника на опорно-поворотное устройство в горизонтальном или вертикальном его положении.

Необходимость решения такой технической задачи вызвана увеличением во всём мире количества запусков попутной полезной нагрузкой или ракетами легкого класса спутников стандарта CubeSat. Для допуска к пуску каждый КА должен пройти ряд испытаний, в число которых входят тепловакуумные испытания. От успешности прохождения этих испытаний во многом зависит успех выполнения всей миссии космического аппарата на орбите.

Общий вид трехмерной модели спроектированного стенда для ТВИ представлен на рисунке 9.

Стенд для ТВИ спутников стандарта CubeSat с интерфейсом связи в разрезе представлен на рисунке 10.

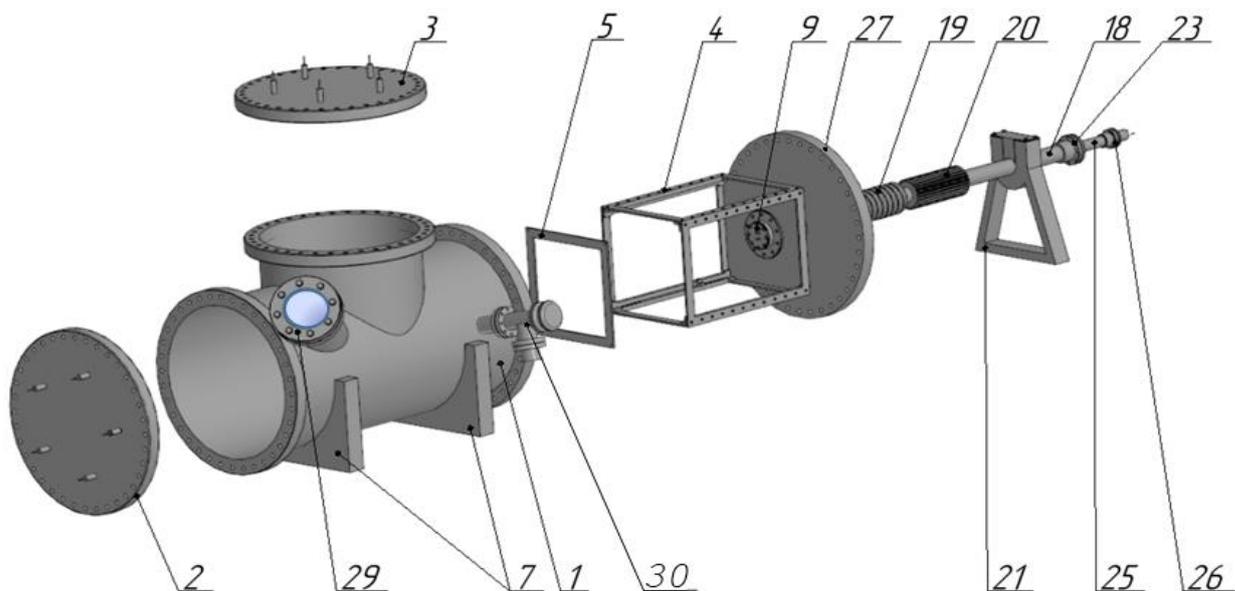


Рисунок 9 – Основные компоненты стенда для ТВИ

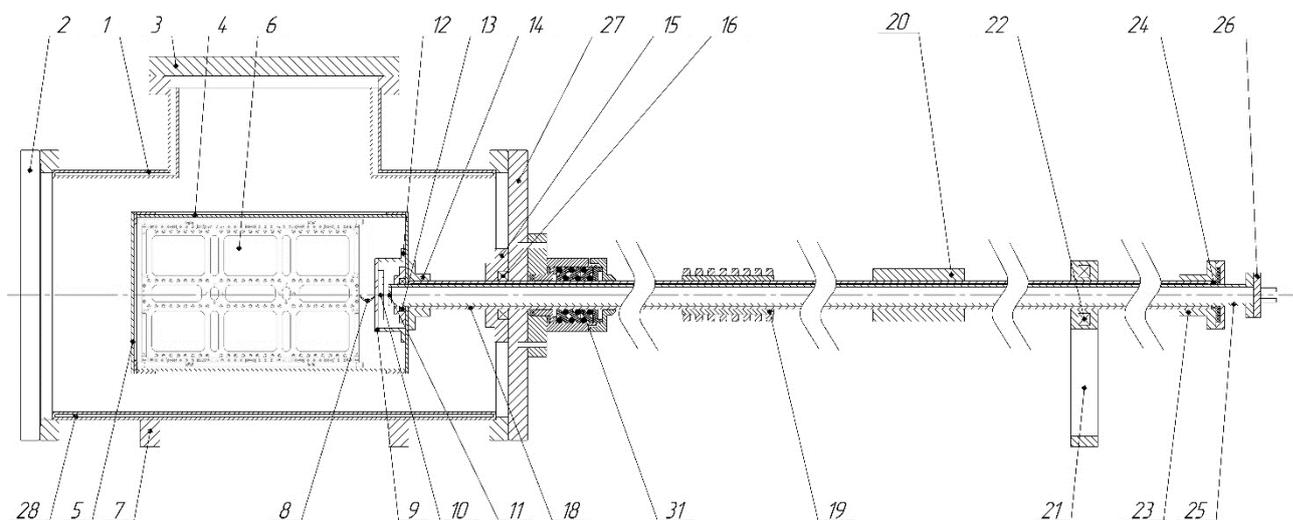


Рисунок 10 – Стенд для тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat с интерфейсом связи в разрезе

В состав устройства входят следующие ЭВС (рисунки 9, 10):

- испытательная вакуумная камера 1, которая выполнена из вертикального и горизонтального Т-образно, соединенных цилиндров и предназначена для создания условий, имитирующих космическое пространство и проведения испытаний спутника;

- опорно-поворотного устройства, которое обеспечивает фиксацию, а также линейное и вращательное перемещение наноспутника внутри ВК, для достижения точных результатов проводимого эксперимента;

Вакуумная камера оборудована:

- фланцем-заглушкой с гермовводами 2;

- фланцем-заглушкой 27, содержащим отверстие, через которое проходит внешний вал, передающий движение к сменной корзине. Размер данного фланца выбран таким образом, чтобы была возможность осуществления загрузки спутника стандарта CubeSat форматом от 1U до 12U (стандартные размеры указаны в Приложении А) внутрь камеры, а также имелся запас на рамную конструкцию сменной фиксирующей корзины 4;

- криогенным экраном 28 для создания низких температур, который расположен во внутреннем контуре стенки ВК;

- имитаторами солнечного излучения, которые представляют собой два источника, смонтированные на фланцах 2 и 3 вакуумной камеры с гермовводами;

- фланцем со смотровым окном 29, предназначенным для визуального контроля за состоянием и перемещением спутника внутри ВК во время эксперимента;

- фланцем 30 для подключения откачного поста;

- опорами 7.

Опорно-поворотное устройство состоит из:

- сменной корзины 4 для фиксации наноспутника внутри вакуумной камеры;

- рамки 5, фиксирующей спутник внутри сменной корзины;

- внешней трубы 18, которая предназначена для передачи линейного и вращательного движения сменной корзине с расположенным в ней спутником;

- подшипника 16, который обеспечивает скольжение внешней трубы;

- кожуха 15, в который помещен подшипник 16;

- кожуха 14, с помощью которого сменная корзина жестко фиксируется на внешнем валу;

- кожуха со стеклом 9, с помощью которого обеспечивается прохождение оптического излучения между элементами интерфейса связи;

- внутренней трубы 25, назначение которой заключается в возможности прокладки интерфейса связи от внутренней полости ВК к фланцу, расположенному на конце этой трубы;

- фиксируемого накладкой подшипника 13, жестко посаженного на внутреннюю трубу 25;

- фланца с гермовводами 26, расположенного на торце внутренней трубы 25, предназначенного для вывода элементов интерфейса связи;

- механизма для передачи возвратно-поступательного движения 19, представляющий из себя реечный механизм, жестко зафиксированный на внешнем валу, к которому будет передаваться вращение от двигателя, посредством зубчатой передачи;

- механизма для передачи вращательного движения 20, представляющего из себя шестерню, жестко зафиксированную на внешнем валу, к которой будет передаваться вращение от двигателя, посредством зубчатой передачи;

- механизма для обеспечения герметичного ввода движения 31;

- кожуха 23;

- подшипника 24, который обеспечивает свободное скольжение внутренней трубы 25;

- опоры 21;

- подшипника 22, который обеспечивает свободное скольжение внешней трубы 18;

- вакуумных прокладок для обеспечения герметичности.

Таким образом, приведено техническое описание стенда для проведения тепловакуумных испытаний. Основным компонентом стенда является испытательная вакуумная камера, внутрь которой помещается сменная корзина со спутником. Движение спутника внутри камеры обеспечивается за счет механизмов, выполненных на внешнем валу опорно-поворотного устройства. Механизмы для передачи движения, в свою очередь, соединены с двигателями.

2.2.1 Описание работы стенда

Спроектированный стенд для тепловакуумных испытаний работает следующим образом.

Для загрузки испытываемого наноспутника снимают боковой фланец, содержащий вакуумный ввод движения. Опорно-поворотное устройство, в состав которого входит сменная корзина, выдвигается из вакуумной камеры. В сменную корзину устанавливается исследуемый наноспутник. На рисунке 10 показана фиксирующая корзина, размеры которой адаптированы под спутник CubeSat 12U. Для наноспутников других форматов необходимо установить корзины, которые соответствуют их размеру. Затем фиксирующая корзина со спутником вместе с опорно-поворотным устройством задвигается в вакуумную камеру. Боковой фланец, содержащий вакуумный ввод движения, устанавливается на свое прежнее место. На данном и следующих этапах при помощи фланца со смотровым стеклом, осуществляется визуальный контроль над испытываемым наноспутником, находящимся в камере.

При необходимости смотровое окно экранируется. При помощи быстроразъёмного фланца к ВК подключается гофра откачного поста. После подключения происходит откачка вакуумной камеры до давления, исключающего конвективный теплообмен, равного 10^{-5} Па. Во время откачки вакуумной камеры происходит охлаждение посредством криогенного экрана. Далее проводятся испытания наноспутника при использовании имитаторов солнечного излучения. Во время проведения испытаний наноспутник одновременно может вращаться и линейно перемещаться вдоль оси своего вращения. Такое перемещение позволяет создавать условия, максимально имитирующим натурные. Вращение и линейное перемещение фиксирующей корзины происходит посредством электропривода. Электропривод адаптирован к шестерне и механизму с шарико-винтовой передачей, которые размещены на внешней трубе, жестко соединенной с опорно-поворотным устройством с корзиной. После завершения тепловакуумных испытаний, прогревают

криогенный экран до комнатной температуры. Вакуумную камеру разгерметизируют.

Таким образом, спроектированный стенд позволяет проводить ТВИ спутников стандарта CubeSat формата от 1U до 12U. Условиях, в которых проводятся испытания, максимально имитируют натурные. Реализована возможность осуществления автоматического контроля над перемещением испытываемого наноспутника внутри испытательной вакуумной камеры. Обеспечено информационное взаимодействие с наноспутником, а также прием телеметрии. Качество испытаний также увеличено за счет обеспечения облегченной установки наноспутника в фиксирующую корзину опорно-поворотного устройства. Реализована возможность визуального контроля над перемещением наноспутника в вакуумной камере.

2.2.2 Описание работы механизмов для передачи движения

Для достижения высокой точности проводимого эксперимента зафиксированный в сменной корзине спутник будет перемещаться внутри камеры как возвратно-поступательным движением, так и вращательным движением вокруг своей оси. Испытываемый спутник будет помещаться в сменную корзину, закрепленную на внешнем валу. Движение вала будет передаваться посредством смонтированных на валу механизмов, к которым с помощью механических передач будут подключены два двигателя. Подключение двигателей нужно для того, чтобы можно было программно задать перемещение спутника внутри камеры во время проведения эксперимента. Такое решение существенно упростит работу специалиста, так как будет отсутствовать необходимость в ручном управлении механизма.

Для передачи вращательного движения представлено устройство с зубчатым типом передачи [3] на рисунке 11, включающее в себя шаговый двигатель, на валу которого жестко посажена ведущая шестерня, которая входит в зацепление с ведомой шестерней, жестко закрепленной на валу опорно-поворотного устройства стенда.

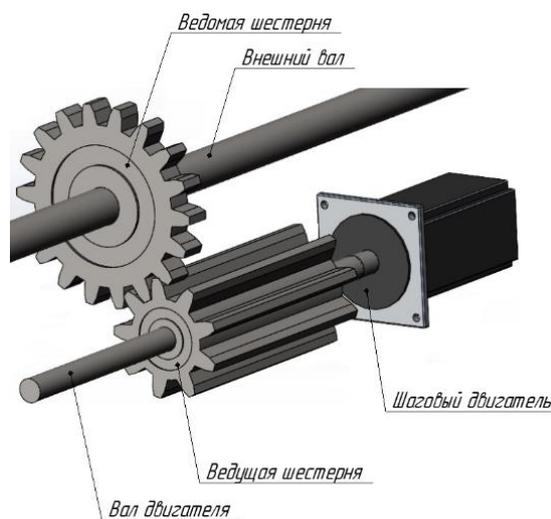


Рисунок 11 – Общий вид механизма для передачи вращательного движения

Ведущая шестерня выполнена удлиненной для того, чтобы не потерять зацепление с ведомой шестерней при линейном перемещении вала испытательного стенда.

Для передачи возвратно-поступательного перемещения рассматривались три варианта его реализации.

Первый вариант передачи линейного движения работает следующим образом. Для осуществления передачи вращения в возвратно-поступательное перемещение, часто используют червячные передачи. Однако в такой тип передачи невозможно реализовать ввиду особенностей червячной передачи, так как при расположении червяка на валу опорно-поворотного устройства он станет ведомым компонентом. Передача движения от шестерни к червяку невозможна из-за риска самостопорения механизма. Изготовление кулисных механизмов, в свою очередь, требует больших затрат на материалы. Для требуемой по заданию передачи движения представлено устройство с зубчатым типом передачи [3] (рисунок 12), включающее в себя шаговый двигатель, на валу которого жестко посажена ведущая шестерня, которая входит в зацепление с ведомой шестерней. Между шестерней и валом опорно-поворотного устройства осуществлена передача винт-гайка [6], которая позволяет передать вращательное движение от шестерни в поступательное движение вала.

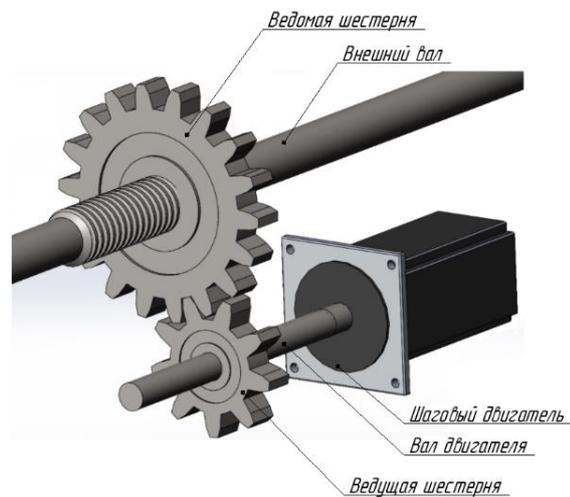


Рисунок 12 – Общий вид механизма для передачи возвратно-поступательного движения

Недостаток данного механизма заключается в том, что при работе устройства для передачи вращения, вращение внешнего вала вызовет самопроизвольный сдвиг на устройстве для линейного перемещения, однако данный эффект можно устранить за счет корректировки движения двигателя на устройстве для линейного перемещения.

Второй вариант передачи движения представлен на рисунке 13 и включает в себя шаговый двигатель, на валу которого жестко посажена ведущая шестерня, которая входит в зацепление с рейкой, жестко закрепленной на валу опорно-поворотного устройства стенда. Ведущая шестерня выполнена на валу двигателя будет передавать движение рейке, длина которой подобрана таким образом, чтобы осуществить перемещение спутника на то расстояние, при котором будет полностью обеспечено воздействие имитаторов солнечного света на спутник. При данном исполнении при работе устройства для передачи линейного и вращательного движения не будут мешать работе друг друга и дополнительная компенсация перемещений не понадобится. Однако недостатком данного исполнения является низкая точность перемещений, большой люфт. Управление реечным механизмом требует меньше деталей для правильной работы, однако это создает большую нагрузку на отдельные детали, повышая износ.

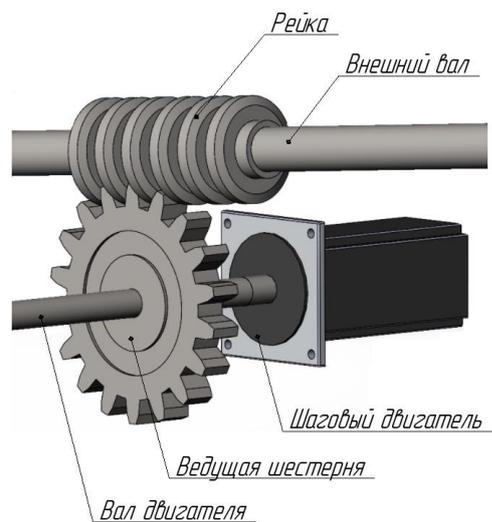


Рисунок 13 – Общий вид реечного механизма для передачи возвратно-
 поступательного движения

Третьим вариантом реализации передачи линейного движения на вал опорно-поворотного устройства может стать использование шарико-винтовой передачи (рисунок 14).

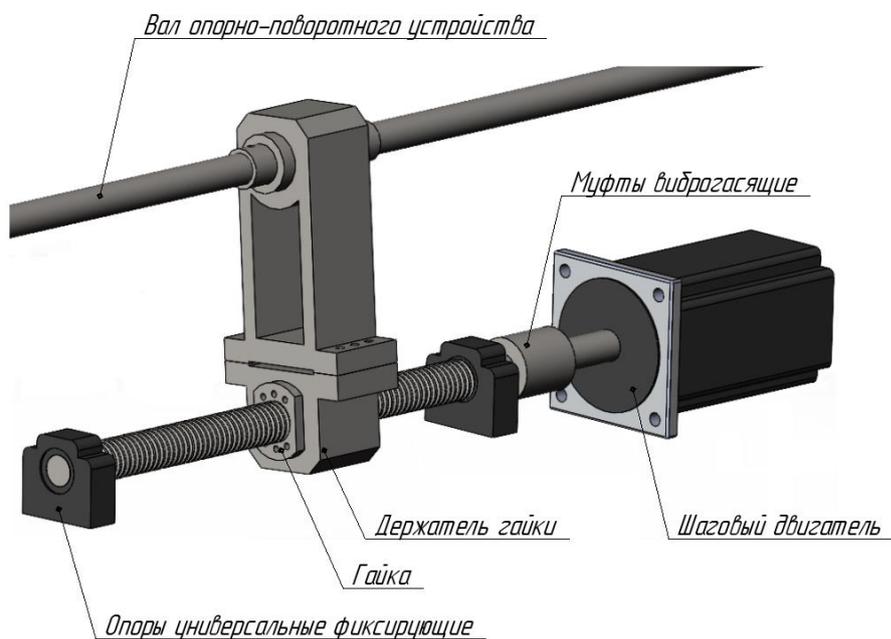


Рисунок 14 – Общий вид механизма для передачи возвратно-поступательного
 движения

Такое исполнение обеспечивает линейное передвижение привода, которое преобразует вращение в поступательное движение.

Винтовая пара данного механизма работает следующим образом:

Во время вращения гайки происходит перекатывание шариков по специальным каналам. Шарики способствуют выталкиванию гайки из резьбы, тем самым перемещая ее поступательно. За счет перепускного канала, шарики возвращаются в изначальное положение. Внутри гайки предусмотрен замкнутый контур для перемещения шариков.

Таким образом, для передачи вращения на вал опорно-поворотного устройства выбран механизм с зубчатой передачей, в котором вращение от вала двигателя передается посредством двух шестерней. Для передачи линейного перемещения за основной принят механизм с шарико-винтовой передачей, который позволяет преобразовать вращательное движение винта, расположенного на валу двигателя, в линейное перемещение посредством гайки, соединенной с фиксатором, который расположен на валу опорно-поворотного механизма. Был выбран именно этот механизм, так как он обеспечивает линейное передвижение привода, которое преобразует вращение в поступательное движение без повышенного износа деталей, как в механизме с реечной передачей. Также при данном исполнении устройства для передачи линейного и вращательного движения не будут мешать работе друг друга и дополнительная компенсация перемещений не понадобится.

Для достижения оптимальной работы выбранных механизмов необходимо учитывать, что двигатели, используемые в установке, должны обладать следующими характеристиками:

- число оборотов, передаваемое на вал опорно-поворотного устройства, должно соответствовать условиям, в которых функционирует спутник;
- необходимо, чтобы была возможность менять направление вращения вала;
- мощности двигателя должно хватать для передачи движения на вал.

Исходя из рассмотренных вариантов исполнений механизмов для передачи движения, требований к работе двигателей, для спроектированного стенда выбраны именно шаговые двигатели, так как они позволяют создавать вращение

с заданной скоростью. В таких двигателях легко изменять направление вращения и можно совершать поворот вала на заданный угол с точностью до долей градусов [4]. Главным их преимуществом является то, что они позволяют получать очень низкое число оборотов без применения промежуточного редуктора. С помощью таких двигателей можно передать сравнительно низкое число оборотов от вала двигателя, к непосредственно соединенным с ним элементам.

Габаритные размеры шагового двигателя, который используется в механизмах для передачи движения, представлены в приложении Б.

Таким образом, учитывая принцип работы механизмов для передачи движения были составлены требования к работе двигателей, на основании которых был выбран шаговый двигатель.

2.2.3 Описание работы интерфейса связи

Проведенный ранее патентный поиск станций для тепловакуумных испытаний наноспутников показал, что недостатком существующих наиболее близких устройств является отсутствие описания связи со спутником во время проведения испытаний.

Одной из поставленных задач данного проектирования является осуществление управления и приёма телеметрии испытываемого наноспутника, а также реализация автоматизированного контроля над его перемещением. Контроль перемещения осуществляется благодаря оптическому интерфейсу связи, который совмещен с опорно-поворотным устройством. Графическое представление интерфейса связи представлено на рисунке 15.

Интерфейс связи работает следующим образом.

Контроль над перемещением испытываемого наноспутника, управление им, а также прием телеметрии осуществляются при помощи оптического интерфейса. Оптический интерфейс состоит из разделенных оптопар. Первая половина этих оптопар подключается к конвертору. Конвертор размещается в корзине и подключается с бортовой сети испытываемого наноспутника. Вторая половина оптопар посредством внутренней трубы станда подключается к

фланцу, который снабжен гермовводами. При помощи гермовводов испытываемый наноспутник подключается к контрольной и управляющей аппаратуре.

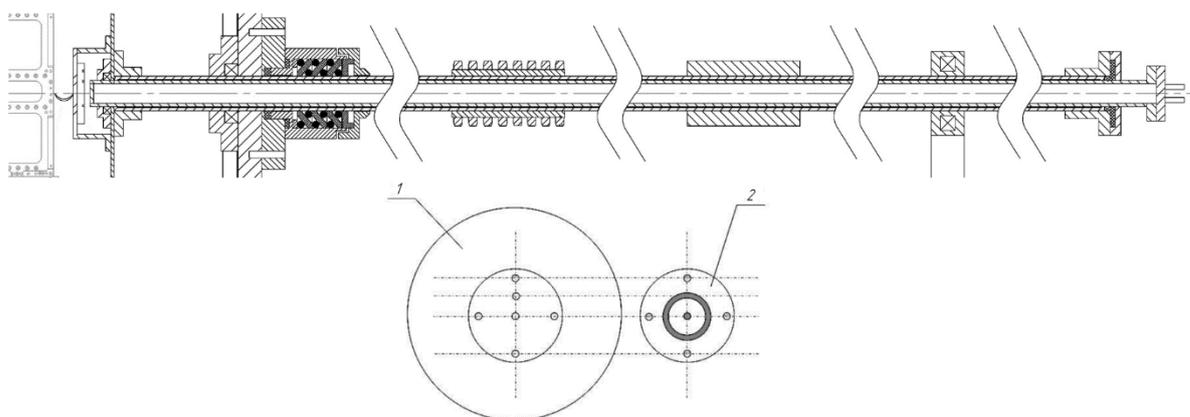


Рисунок 15 – Интерфейсные панели бесконтактной связи стенда для тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat

Интерфейс связи включает в себя следующие элементы (рисунок 15).

1) Интерфейсную плату 1, в состав которой входят:

- четыре лазерных диода, расположенных по краям платы и предназначенных для осуществления позиционирования испытываемого наноспутника;

- один фотоприемник, расположенный в центре платы и предназначенный для входящего управляющего сигнала;

- один лазерный диод, который расположен между фотоприемником и крайним лазерным диодом, предназначенный для исходящего информационного сигнала.

2) Интерфейсную плату 2, в состав которой входят:

- четыре лазерных диода, расположенных по краям платы и предназначенных для осуществления позиционирования испытываемого наноспутника;

- один фотоприемник, выполненный в виде окружности и предназначенный для входящего информационного сигнала;

– один лазерный диод, расположенный в центре, предназначенный для исходящего управляющего сигнала.

Таким образом, было спроектировано устройство для осуществления связи с наноспутником, находящимся внутри ВК, во время проведения эксперимента.

2.2.4 Описание вакуумного уплотнения ввода движения

Так как спроектированный стенд для тепловакуумных испытаний содержит устройство для передачи движения внутрь вакуумной камеры, необходимо обеспечить герметичность соединений для сведения к минимуму натеканий атмосферного воздуха внутрь камеры.

Для решения этой проблемы используются специальные уплотнения для вакуумных вводов. Существует устройства для передачи возвратно-поступательного, колебательного, вращательное движения. Одной из разновидностей таких устройств являются механические вакуумные вводы, предназначенные для передачи движения извне к узлам, находящимся внутри вакуумных камер. Существуют следующие виды механических вакуумных вводов:

- вводы, передающие движение посредством отверстия, выполненного в стенке;
- вводы, передающие движение через сплошную стенку;
- вводы, передающие движение через сплошную стенку посредством выполнения разрыва вала.

Из существующих механических вакуумных вводов был выбран ввод через отверстие в стенке. Общий вид выбранного механизма для обеспечения герметичности в разрезе представлен на рисунке 16.

В данном типе передачи движения основными элементами, обеспечивающими герметичность, являются уплотнительные прокладки. Преимуществом такого уплотнения является то, что оно работает без смазки. Скольжение вала обеспечивается посредством колец из фторопласта. Резиновые кольца обеспечивают уплотнению эластичность и герметичность. Для

обеспечения плотного прилегания элементов уплотнения служит прижимная гайка.

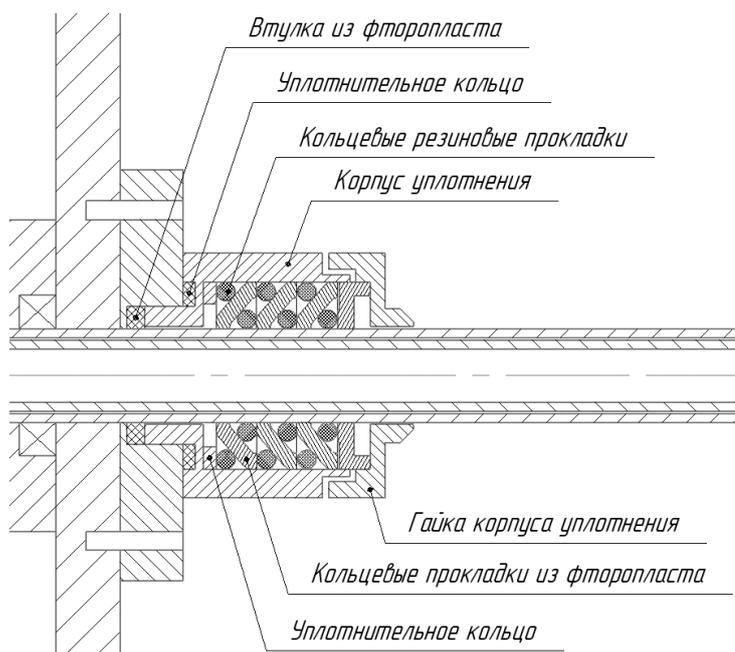


Рисунок 16 – Общий вид механизма для обеспечения герметичности в разрезе

Был выбран именно этот вид герметизации ввода движения, так как он не требует смазки, диапазон его рабочих температур колеблется в пределах от -255 до $+220$ °С, а также данный механизм способен передать как вращение, так и линейное движение в высоковакуумных системах [2].

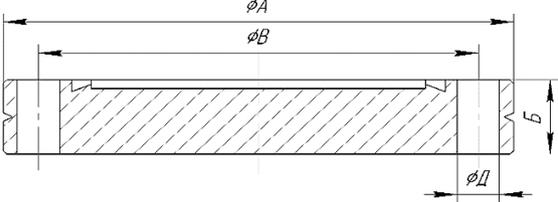
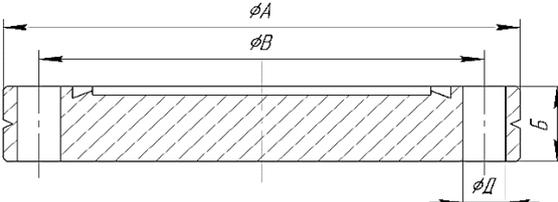
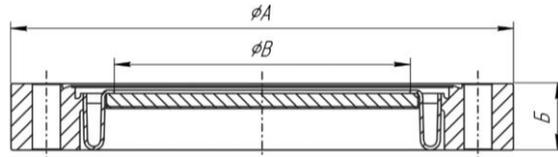
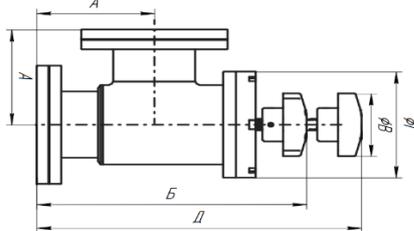
2.2.5 Выбор фланцев

В целях снижения себестоимости изделия были выбраны стандартные фланцы, используемые в вакуумной технике (таблица 3), так как их изготовление под заказ намного дороже.

Помещение наноспутника внутрь вакуумной камеры будет осуществляться путем отсоединения двух вертикальных вертикально расположенных глухих фланца, один из которых содержит герметичный ввод для передачи возвратно-поступательного и вращательного движения внутрь камеры. Размер данных фланцев подобран из стандартных таким образом, чтобы можно было свободно поместить внутрь ВК наноспутник самого большого

формата – CubeSat 12U. Также вакуумная камера будет содержать фланец со смотровым окном и фланец для подключения гофры откачного поста.

Таблица 3 – фланцы и их применение в спроектированной камере[10]

Тип фланца	Размеры
FB – CF350 (фланец-заглушка, фланец вертикальный) 	$\phi A = 419.1$ мм; $\phi B = 388.9$ мм; $\phi D = 10.3$ мм; $B = 28.5$ мм; Число отверстий под болты $N = 36$
FB – CF300 (фланец-заглушка верхний) 	$\phi A = 355.6$ мм; $\phi B = 325.7$ мм; $\phi D = 10.3$ мм; $B = 28.5$ мм; Число отверстий под болты $N = 30$
VP-CF200-SS/G7056 (фланец со смотровым окном) 	$\phi A = 202$ мм; $\phi B = 135$ мм; $B = 22$ мм;
MAV-HV-CF-63 (фланец для подключения откачного поста) 	$A = 88$ мм. $\phi B = 60$ мм. $B = 209$ мм. $D = 251$ мм. $\phi \Gamma = 102$ мм.

Таким образом, был определен набор фланцев, обеспечивающих работу вакуумной камеры.

2.3 Расчет времени откачки вакуумной камеры

Ниже представлен расчет времени откачки спроектированной вакуумной камеры откачным постом NiCube 80 Eсо до давления 10^{-5} Па. Внутренний объем

вакуумной камеры был вычислен при помощи в программной среде Autodesk Inventor.

Схема вакуумной откачки спроектированного стенда включает в себя ВК, трубопровод и турбомолекулярный ВН, представлена на рисунке 17.

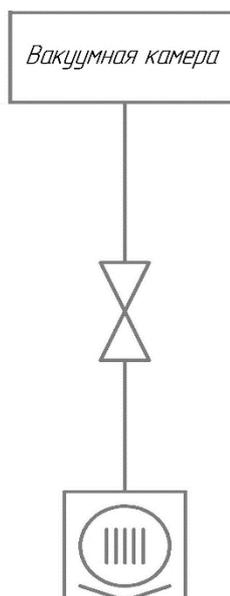


Рисунок 17 – Схема вакуумной откачки спроектированного стенда

Выполнение схемы осуществлялось согласно ГОСТ 2.797-81 и ГОСТ 2.796-95.

Быстрота откачки вакуумной системы S_0 находится по формуле[10]:

$$S_0 = \frac{dV}{dt} = 35 \frac{\text{л}}{\text{с}^{-1}} \quad (1)$$

Пропускная способность Q ($\text{Па} \cdot \text{л} / \text{с}^{-1}$) определялась как:

$$Q = p \cdot S_0 = 35 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \frac{\text{л}}{\text{с}^{-1}}, \quad (2)$$

где $p = 10^{-5}$ Па – требуемое давление;

dV/dt – объем, проходящий за единицу времени.

Скорость откачки ν (л/с⁻¹):

$$\nu = \frac{Q}{p} = 35 \frac{\text{л}}{\text{с}^{-1}}, \quad (3)$$

где p – требуемое давление, Па;

Q – производительность или пропускная способность, Па·л/с⁻¹.

Время, необходимое для откачки вакуумного объема от давления p_1 до давления p_2 :

$$t = \left(\frac{V}{s} \right) \cdot \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) = 2,3 \text{ час}, \quad (4)$$

где V – объем вакуумной камеры, м³;

S – быстрота действия вакуумного насоса, м³/с;

p_1 – начальное давление в вакуумной камере, Па;

p_2 – конечное давление в вакуумной камере, Па.

Для спроектированной вакуумной камеры объемом 0,067 м³, время достижения давления 10⁻⁵ Па в вакуумной камере составляет 2,3 часа. Расчет времени откачки ВК позволяет убедиться в том, что время достижения требуемого вакуума позволяет в течение рабочего дня создать в ВК необходимое давление, а также провести сам эксперимент.

2.4 Выбор конструкционных материалов для компонентов спроектированного стенда

Для расчета газовой нагрузки тепловакуумного стенда необходимо определить оптимальные конструкционные материалы для элементов тепловакуумной системы. Данный этап проектирования позволит определить

наиболее подходящие материалы для спроектированного тепловакуумного стенда и его отдельных компонентов, для обеспечения оптимальной работы каждого из них. Материалы следует выбирать исходя из требований, предъявляемых к вакуумной технике, а также назначения каждого компонента стенда и условий, в которых он будет функционировать.

2.4.1 Корпус вакуумной камеры

Для изготовления корпуса вакуумной камеры была выбрана нержавеющая сталь аустенитного класса 12Х18Н10Т. Главными преимуществами такой стали являются: жаростойкость, жаропрочность, высокая хладостойкость, немагнитность, низкая теплопроводность и удовлетворительная сопротивляемость межкристаллитной коррозии. Сталь 12Х18Н10Т часто применяется для изготовления узлов и деталей вакуумных установок, внутри которых создается давление не ниже $p = 1 \times 10^{-12}$ мм рт. ст., работающих при температурах от -260 до $+1000$ °С. Эта сталь пригодна для изготовления корпусов вакуумных насосов и установок, термобарокамер, экранов, держателей и корпусов приборов [24]. Еще одними из достоинств являются высокая свариваемость разнообразными методами электросварки (в особенности аргонодуговой), возможность паки твердыми и мягкими припоями, удобство при обработке резанием (с учетом применения твердосплавного инструмента), высокая пластичность при холодной деформации. Интервал горячей деформации составляет $900 - 1150$ °С [24].

2.4.2 Опорно-поворотное устройство

Для выбора материала опорно-поворотного механизма особое значение имеет коэффициент теплопроводности, так как нельзя допустить теплоотвод от исследуемого объекта. Был произведен анализ наиболее подходящих для вакуумной техники сталей. В таблице 4 представлены значения коэффициента теплопроводности для сталей, используемых в вакуумной технике. Из указанных в таблице необходимо выбрать сталь, у которой наименьший коэффициент теплопроводности.

Таблица 4 – Зависимость коэффициента теплопроводности λ (Вт/(м·К)) сталей от температуры проведения эксперимента

Коэффициент теплопроводности	20 °С	100 °С	200 °С	300 °С	400 °С	500 °С	600 °С	700 °С	800 °С	900 °С
Марка стали										
12X18H10T	15	16	18	19	21	23	25	27	26	-
12X18H9T	-	16	18	20	21	23	25	26	28	29
40X	-	46	43	39	36	-	-	-	-	-
40X13	25	26	27	28	29	29	29	28	28	29
12X17Г9АН4	15,1	15,9	17,6	18,8	20,1	20,9	22,2	23,4	24,3	-
12X13	-	28	28	28	28	27	26	26	25	27
20X13	-	26	26	26	26	27	26	26	27	28
20X23H18	16	17	-	19	-	22	-	-	-	-
20X23H13	-	-	17	19	21	23	24	27	29	31
14X17H2	21	22	23	24	24	25	26	27	28	30
30X13	-	26	27	28	27	27	27	27	25	27

По данной таблице видно, что наименьшим коэффициентом теплопроводности обладает сталь марки 12X18H10T, которую примем для опорно-поворотного механизма.

2.4.3 Теплоизолирующие накладки

Для исключения теплопередачи от исследуемого объекта к элементам конструкции будут использоваться накладные пластины. Далее рассмотрены материалы для вакуумной техники, у которых коэффициент теплопроводности существенно ниже, чем у сталей. К таким материалам относят керамики, фторопласты, резины и т.п. В качестве материала для накладных теплоизолирующих пластин выбран фторопласт-4, так как он обладает низким коэффициентом теплопроводности $\lambda=0,25$ Вт/(м·К), выдерживает температуры от -169°C до $+260^{\circ}\text{C}$, обладает низким коэффициентом трения, равным 0,004%, его газовыделение составляет менее 0,01%. Также этот материал является прочным и химически устойчивым. Фиксация фторопластовых накладок показана на рисунке 18.

Отверстие под потайную головку будет выполнено таким образом, чтобы головка винта не контактировала с исследуемым объектом. Такое исполнение

принято для того, чтобы избежать теплоотдачи от исследуемого спутника к элементам конструкции через крепежные изделия.

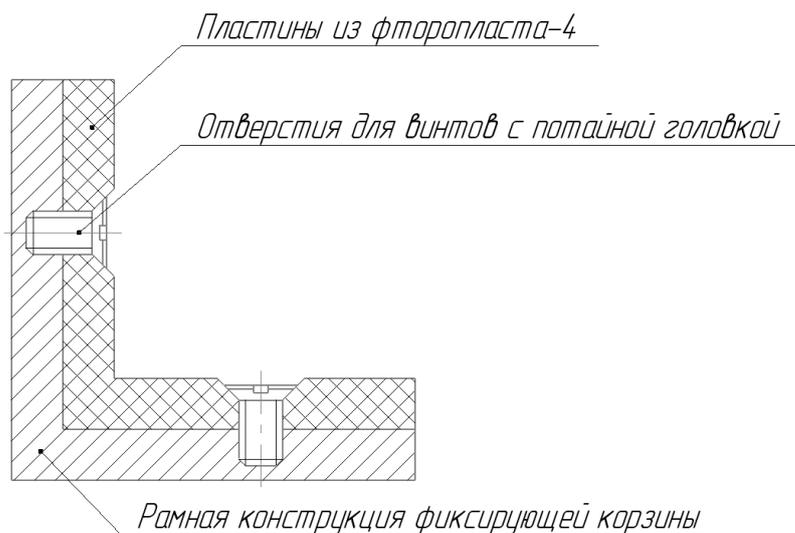


Рисунок 18 – Схематичное представление способа фиксации фторопластовых накладок

Таким образом, определены материалы для компонентов стенда для ТВК. Для изготовления корпуса вакуумной камеры и для фиксирующей корзины опорно-поворотного устройства была выбрана нержавеющей сталь аустенитного класса 12Х18Н10Т. Для изготовления теплоизолирующих накладок был выбран фторопласт-4.

2.5 Расчет габаритных размеров спроектированного стенда

Для определения размеров вакуумной камеры необходимо учитывать, что стенд предназначен для проведения тепловакуумных испытаний наноспутников стандарта CubeSat от 1U до 12U.

Обязательным условием проведения тепловакуумных испытаний является создание в испытательной камере давления, при котором отсутствует конвективный теплообмен. Для этого достаточно давления, равного 10^{-5} Па.

По типу корпуса вакуумная камера является цилиндрической.

Учитывая стандартные габаритные размеры спутника формата CubeSat 12U ($0,2263 \times 0,2263 \times 0,3405$ м) [20], крепление, стандарты на фланцы, был

определен оптимальный внутренний диаметр вакуумной камеры – 0,35 м и её объём - 0,067 м³.

Диагональ основания спутника составляет 0,32 м, при выборе размера внутреннего диаметра также был учтен запас на рамную конструкцию и криогенные экраны.

Длина камеры была выбрана таким образом, чтобы иметь возможность перемещать спутник внутри камеры для равномерного воздействия имитатора солнечного излучения.

Для получения в испытательной ВК низких температур необходимо оснастить ее криогенными экранами. Решением данной задачи является выполнение двойной стенки вакуумной камеры и размещение криогенного экрана в полости между стенками.

2.5.1 Расчет толщины стенок вакуумной камеры

Толщины внешней и внутренней стенки вакуумной камеры будут различны. Это объясняется повышенными требованиями к внутренней стенке ВК, так как она будет выдерживать нагрузку от возникающей разницы давлений. Для ее расчета воспользуемся формулами для расчета цилиндрических обечаек, нагруженных давлением.

Рассчитаем толщину внутренней стенки ВК.

Основные параметры:

- внутренний диаметр камеры $D_{внутр} = 350$ мм;
- длина камеры $L = 697,8$ мм;
- диаметр верхнего патрубка = 284,8 мм;
- объём камеры $V = 0,067$ м³.

Главные формулы для вычисления толщины внутренней стенки испытательной вакуумной камеры[6]:

$$s \geq s_p + c \tag{5}$$

$$s_p \approx \max \left\{ K_2 \cdot D_{\text{внутр}} \cdot 10^{-2}; \frac{1,1 \cdot p \cdot D_{\text{внутр}}}{2 \cdot [\sigma]} \right\}, \quad (6)$$

где коэффициент K_2 можно определять как функцию отношений K_1 и K_3 [6]:

$$K_1 = \frac{n_y}{2,4} \cdot \frac{p}{10^{-6} \times E}, \quad (7)$$

$$K_3 = \frac{l}{D_{\text{внутр}}} \quad (8)$$

Значение коэффициента запаса устойчивости (n_y) для расчета обечаек на устойчивость принимают равным 2,4 [6].

Для нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т допустимое напряжение $\sigma = 160$ МПа, в свою очередь модуль упругости составляет значение $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, принимается наружное давление, равное $p_n = 0,1$ МПа, а также испытательное давление, равное 0,2 Мпа [6].

Вычислим коэффициенты K_1 и K_3 по формулам[6]:

$$K_1 = \frac{2,4}{2,4} \times \frac{0,1}{10^{-6} \times 2 \times 10^5} = 0,5,$$

$$K_3 = \frac{0,6978}{0,35} = 1,994.$$

По номограмме, указанной в приложении В, будем определять коэффициент K_2 , значение которого составляет 0,45. По формуле (2) вычислим значение s_p [6]:

$$s_p = K_2 \cdot D_{\text{внутр}} \cdot 10^{-2} = 0,45 \cdot 0,35 \cdot 10^{-2} = 0,251 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

$$s_p = \frac{1,1 \cdot p \cdot D_{\text{внутр}}}{2 \cdot [\sigma]} = \frac{1,1 \cdot 0,1 \cdot 0,35}{2 \cdot 160} = 0,042 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Выбираем наибольшее значение для $s_p = 0,00251 \text{ м} = 2,51 \text{ мм}$.

Величина прибавки c колеблется в пределах $(0,05..0,18) s_p$ [6].

Учтем прибавки $c = 0,2844$ мм, тогда значение $s_p = 2,51 + 0,2844 = 2,79$ мм. Округлим величину до 3 мм, что соответствует целому значению для толщины стальных листов.

Дальнейший расчет стенки вакуумной камеры сводится к вычислению допускаемого внешнего давления, вычислим по формуле:

$$[p] = \frac{[p]_п}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_п}{[p]_E}\right)^2}}, \quad (9)$$

где $[p]_п$ – величина допускаемого напряжения согласно условию прочности, Па;

$[p]_E$ – величина допускаемого напряжения согласно условию устойчивости, Па.

Вычислим значение допускаемого давления согласно условию прочности:

$$[p]_п = \frac{2 \cdot |\sigma| \cdot (s - c)}{D + (s - c)}, \quad (10)$$

$$[p]_п = \frac{2 \cdot 160 \cdot (0,003 - 0,000279)}{1 + (0,003 - 0,000279)} = 1,875 \text{ МПа}.$$

Вычислим значение допускаемого давления согласно условию устойчивости [6]:

$$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D_{\text{внутр}}}{n_y \cdot B_1 \cdot l} \cdot \left[\frac{100(s - c)}{D} \right]^{2,5}, \quad (11)$$

где E – это значение модуля упругости, Па;

n_y – это значение коэффициента запаса устойчивости, $n_y = 2,4$.

B_1 – это значение безразмерного коэффициента ($B_1 \leq 1$):

$$B_1 = \min \left\{ 1, 0; 9,45 \cdot \frac{D}{1} \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{внутр}}}{100 \cdot (s-c)}} \right\}, \quad (12)$$

$$B_1 = 9,45 \cdot \frac{0,35}{0,6978} \sqrt{\frac{0,35}{100 \cdot (0,003 - 0,000279)}} = 6,23.$$

Из полученных значений B_1 необходимо выбрать меньшее:

$$B_1 = \min \{1, 0; 6,57\} = 1.$$

Тогда по формуле (7):

$$[p]_E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,35}{2,4 \cdot 1 \cdot 0,6978} \cdot \left[\frac{100 \cdot (0,003 - 0,000279)}{0,366} \right]^{2,5} = 0,18 \text{ МПа}.$$

Рассчитаем допускаемое давление по формуле (5):

$$[p] = \frac{1,875}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,875}{0,18} \right)^2}} = 0,18 \text{ МПа}.$$

При полученном соотношении цилиндрическую обечайку можно считать устойчивой:

$$0,18 > 0,1 \text{ МПа}.$$

Данный расчет был выполнен согласно ГОСТ 14249-89, однако в данном источнике для вакуумных камер расчет предполагается нагружением внешним давлением, равным атмосферному, и нет поправок на низкие внутренние давления. В связи с этим был проведен расчет толщины стенки вакуумной камеры в САПР SolidWorks.

Для фланцев и патрубков был выбран материал AISI 304 – аустенитная сталь с низким содержанием углерода, часто используемая для изготовления вакуумной арматуры на производстве. Сталь марки 12X18H10T, выбранная для изготовления корпуса, отсутствует в базе SolidWorks, поэтому был выбран ее

ближайший аналог AISI 321 (08X18H10T). Это аустенитная высоколегированная коррозионноустойчивая сталь.

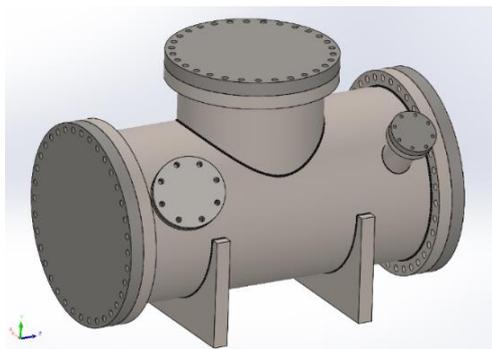


Рисунок 19 – Вакуумная камера, построенная в САПР SolidWorks

Инструментами SolidWorks был построен корпус ВК (рисунок 19), толщина стенки которого составляет 3 мм, внутри камеры создано давление, действующее на стенки, равное 10^{-5} Па.

Статическое исследование корпуса вакуумной камеры проведено с учетом тепловой нагрузки. Была задана начальная температура внутри камеры, равная $+50^{\circ}\text{C}$, и конечная температура, которая составила -170°C . Температура снаружи камеры равна $+20^{\circ}\text{C}$.

Для выполнения статического исследования была создана сетка на основе кривизны, являющаяся наиболее точной, и было проведено закрепление камеры на поддерживающих опорах (рисунок 20).

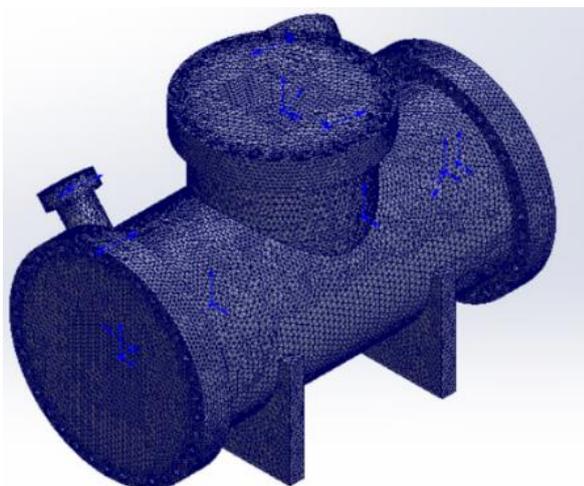


Рисунок 20 – Создание сетки детали в SolidWorks

Для металлов коэффициент запаса прочности должен составлять значение больше единицы, чему соответствуют области синего цвета на полученных эпюрах.

Однако при такой толщине стенки камера будет обладать недостаточным запасом прочности, что видно по рисунку 21, где распространение коэффициента запаса прочности по корпусу составляет минимальное значение.

Для увеличения показателя запаса прочности корпуса вакуумной камеры была увеличена толщина стенки до 4 мм.

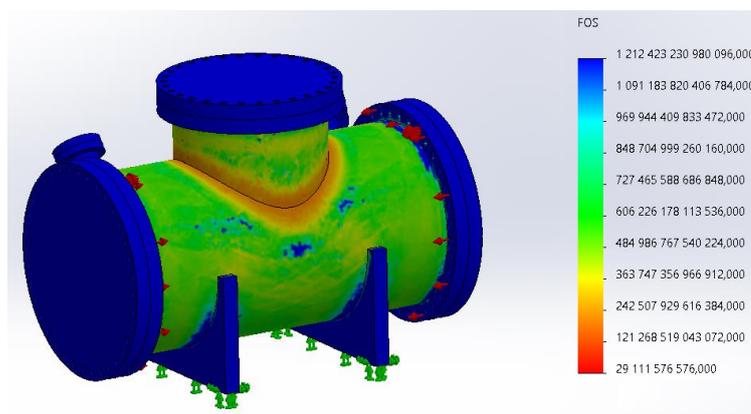


Рисунок 21 – Эпюра запаса прочности для расчетной толщины внутренней стенки, равной 3 мм

На рисунке 22 представлена эпюра запаса прочности при толщине стенки, равной 4 мм, где распространение коэффициента запаса прочности по корпусу составляет преимущественно максимальное значение больше единицы.

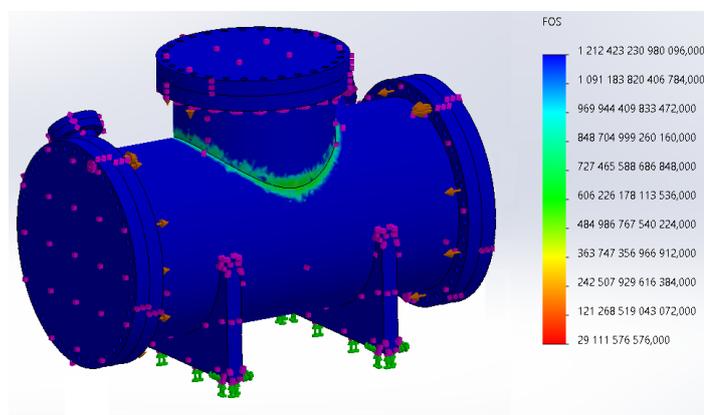


Рисунок 22 – Эпюра запаса прочности для расчетной толщины внутренней стенки, равной 4 мм

Таким образом, для создаваемого внутреннего давления в камере, равного 10^{-5} Па при внешнем давлении, равном нормальному атмосферному давлению, условиям запаса прочности удовлетворяет толщина внутренней стенки, равная 4 мм.

Проведем расчет толщины внешней стенки ВК.

Основные параметры:

- внутренний диаметр обечайки внешней стенки $D = 366$ мм;
- длина камеры $L = 697,8$ мм;
- диаметр верхнего патрубка = 308,8 мм;
- объём камеры $V = 0,067$ м³.

Для вычисления толщины внутренней стенки испытательной вакуумной камеры основными являются формулы (5) и (6)[6]:

Вычислим коэффициенты K_1 и K_3 по формулам[6]:

$$K_1 = \frac{n_y}{2,4} \cdot \frac{p}{10^{-6} \cdot E}, \quad (13)$$

$$K_3 = \frac{l}{D_{\text{внешн}}}, \quad (14)$$

$$K_1 = \frac{2,4}{2,4} \cdot \frac{0,1}{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5} = 0,5,$$

$$K_3 = \frac{0,6978}{0,366} = 1,9.$$

По номограмме, указанной в приложении В, будем определять коэффициент K_2 , значение которого составляет 0,45. По формуле (6) вычислим значение s_p [6]:

$$s_p \approx \max \left\{ K_2 \cdot D_{\text{внешн}} \cdot 10^{-2}; \frac{1,1 \cdot p \cdot D_{\text{внешн}}}{2 \cdot [\sigma]} \right\}, \quad (15)$$

$$s_p = K_2 \cdot D_{\text{внешн}} \cdot 10^{-2} = 0,45 \cdot 0,366 \cdot 10^{-2} = 0,165 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

$$s_p = \frac{1,1 \cdot p \cdot D_{\text{внешн}}}{2 \cdot [\sigma]} = \frac{1,1 \cdot 0,1 \cdot 0,366}{2 \cdot 160} = 0,013 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Выбираем наибольшее значение для $s_p = 0,00165 \text{ м} = 1,65 \text{ мм}$.

Величина прибавки c колеблется в пределах $(0,05..0,18) s_p$ [6].

Учтем прибавки $c = 0,2844 \text{ мм}$, значение $s_p = 1,65 + 0,2844 = 1,8644 \text{ мм}$.

Округлим величину до 2 мм.

Дальнейший расчет стенки вакуумной камеры сводится к вычислению допускаемого внешнего давления, которое вычислим по формуле:

$$[p]_{\text{п}} = \frac{2 \cdot 160 \cdot (0,002 - 0,00018)}{1 + (0,002 - 0,00018)} = 1,655 \text{ МПа}.$$

B_1 – это значение безразмерного коэффициента ($B_1 \leq 1$):

$$B_1 = 9,45 \cdot \frac{0,366}{0,6978} \sqrt{\frac{0,366}{100 \cdot (0,002 - 0,00018)}} = 6,57$$

Выбираем меньшее значение B_1 :

$$B_1 = \min \{1, 0; 6,57\} = 1.$$

Вычислим значение допускаемого давления согласно условию устойчивости [6]:

$$[p]_{\text{Е}} = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,366}{2,4 \cdot 1 \cdot 0,6978} \cdot \left[\frac{100 \cdot (0,002 - 0,00018)}{0,35} \right]^{2,5} = 0,17 \text{ МПа}.$$

Рассчитаем допускаемое давление по формуле (15):

$$[p] = \frac{1,655}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,655}{0,17} \right)^2}} = 0,17 \text{ МПа}.$$

При полученном соотношении цилиндрическую обечайку можно считать устойчивой, так как значение допускаемого напряжения не превышает значение рассчитанного допускаемого напряжения:

$$0,17 > 0,1 \text{ МПа}.$$

Таким образом, расчет показал, что при толщине внутренней стенки, равной 4 мм, и толщине внешней стенки, равной 2 мм, конструкция будет обладать достаточным запасом прочности.

2.5.2 Расчет размеров фиксирующей корзины

Размер фиксирующей корзины определяется размерами спутника стандарта CubeSat 12U, представленными в приложении А.

Для выбора оптимальной толщины конструкции фиксирующей корзины, проведем частотный анализ, с указанием экспериментальных температур.

При проведении частотного анализа модель обычно создается на основе исходной (недеформированной) формы. Дополнительные термические нагрузки, могут вызвать значительное влияние на форму конструкции и ее модальные свойства.

При тепловой нагрузке была задана начальная температура, равная $+100^{\circ}\text{C}$, и конечная температура, которая составила -170°C . Внешняя температура принята равной 20°C .

Инструментами SolidWorks выполняем построение, применяем зафиксированную геометрию и строим сетку (рисунок 23). Количество мод примем равным 43. Полученные результаты анализа представлены на рисунке 24 и в таблице 5.

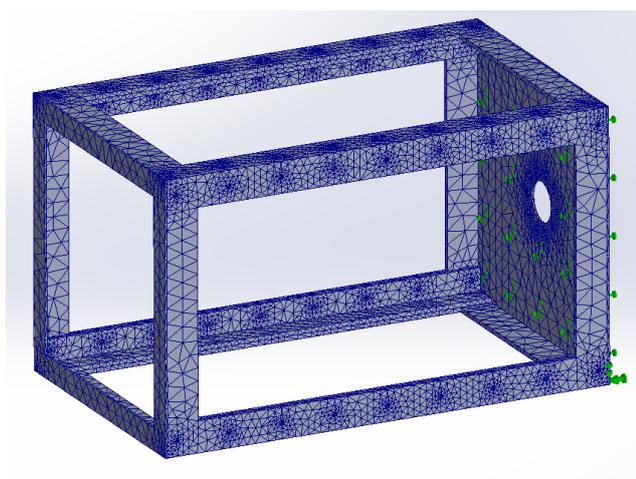


Рисунок 23 – Построение фиксирующей корзины в САПР SolidWorks и создание крепления и сетки

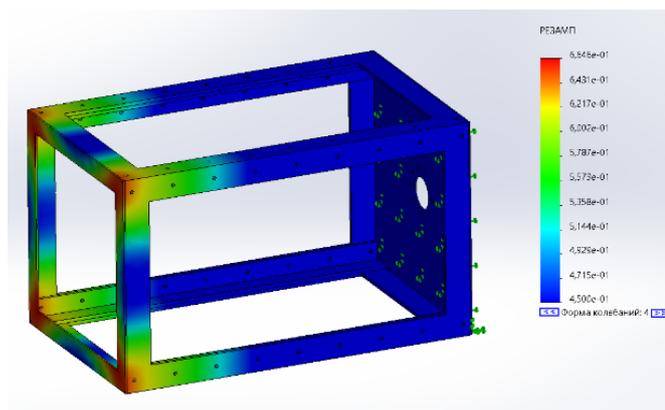


Рисунок 24 – Результат испытания опорно-поворотного устройства в САПР
SolidWorks

Таблица 5 – Расчетные собственные частоты колебаний опорно-поворотного устройства

Режим No.	Частота (Герц)	Направление X	Направление Y	Направление Z
1	163,11	0,08875	0,001149	1,48E-10
2	163,17	0,00015	0,068741	4,44E-10
3	233,94	5,46E-07	1,47E-07	8,64E-10
4	250,96	1,09E-07	2,60E-08	6,47E-11
5	442,69	2,34E-10	8,36E-11	0,009824
6	565,89	1,03E-07	7,98E-09	4,58E-08
7	590,88	0,000149	0,013605	2,47E-08
8	591,19	0,026654	0,000146	1,03E-10
9	718,61	2,37E-07	5,19E-07	5,47E-10
10	836,84	1,42E-06	1,83E-07	1,34E-09
11	895,99	0,067399	0,000751	6,81E-08
12	896,35	0,000752	0,081477	5,03E-10
13	995,14	1,63E-06	0,000577	3,14E-09
14	995,68	0,000574	2,80E-08	8,58E-08
15	997,14	2,90E-06	0,012752	1,72E-09
16	1 115,7	2,34E-10	1,22E-08	0,000319
17	1 421,6	3,24E-08	3,77E-08	0,037218
18	1 510,1	1,23E-06	0,015474	5,37E-07
19	1 511,1	0,023512	1,09E-06	1,44E-07
20	1 606,3	0,001570	5,36E-07	2,71E-07
21	1 679,4	0,034532	3,00E-06	1,63E-08
22	1 686,0	1,55E-07	5,75E-07	2,43E-07
23	1 718,9	4,26E-05	0,004707	5,98E-13
24	1 719,8	0,002689	4,77E-05	1,97E-07
25	1 744,5	1,05E-06	4,45E-07	9,26E-11
26	1 854,2	0,017978	0,000283	7,80E-06
27	1 854,5	0,000295	0,009824	5,73E-05
28	1 890,6	5,09E-07	7,21E-06	0,063771
29	2 049,1	1,75E-06	1,81E-05	7,35E-07
30	2 057,4	0,012712	0,004203	1,28E-08

Режим No.	Частота (Герц)	Направление X	Направление Y	Направление Z
31	2 057,8	0,002172	0,012895	1,26E-05
32	2 082,1	3,00E-05	1,02E-05	1,52E-06
33	2 287,5	0,010032	5,66E-05	1,41E-07
34	2 287,9	6,04E-05	0,015981	7,66E-08
35	2 392,3	1,30E-07	1,29E-08	2,09E-06
36	2 581,0	6,15E-09	2,19E-06	0,044432
37	2 589,3	1,37E-07	1,23E-07	0,003502
38	2 648,6	0,000487	0,001603	0,000132
39	2 650,1	0,001705	0,000558	2,93E-05
40	2 674,2	7,37E-05	0,000121	2,54E-09
41	2 859,0	4,09E-09	1,28E-08	4,22E-07
42	2 997,6	2,75E-09	1,69E-07	0,015091
43	3 058,5	2,92E-05	0,005271	9,16E-06
		Сумма X = 0,68699	Сумма Y = 0,69018	Сумма Z = 0,57359

Массовое участие показывает, какие режимы наиболее опасны, и сколько частот необходимо, чтобы точно захватить весь динамический отклик конструкции. Чем ближе суммарное массовое участие к 100%, тем лучше. Но так как реальная конструкция имеет бесконечное число степеней свободы, дальнейшее увеличение числа мод бессмысленно.

При первой собственной частоте, равной 163,11 Гц, резонанс возможен, если конструкция подвергается воздействию вдоль оси X. Значение 0,08875 означает, что в данном направлении при резонансе будет задействовано 8,9% массы конструкции. Данный режим в направлении X является самым опасным.

В направлении вдоль оси Y возможен резонанс при собственной частоте, равной 896,35 Гц, при которой будет задействовано 8,1% массы конструкции. Данный режим в направлении Y является самым опасным.

В направлении вдоль оси Z наиболее опасным является мод, с собственной частотой 1 890,6 Гц, при которой будет задействовано 6,3 % массы конструкции.

Воспользуемся командой «определить график отклика». В результате анализа были получен график зависимости частоты от действительного коэффициента массового участия (рисунок 25). Этот график показывает значение коэффициента массового участия в процентном соотношении по

направлению каждой из осей, что удобно для определения наиболее опасных частот по каждой оси.

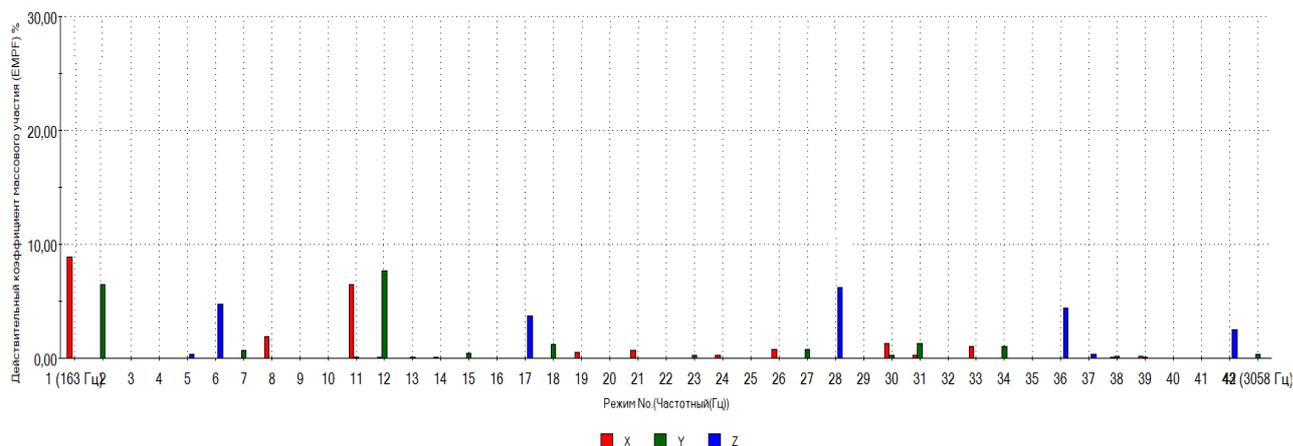


Рисунок 25 – График зависимости частоты от действительного коэффициента массового участия

Таким образом, методами программного комплекса САПР SolidWorks был проведен расчет собственных частот колебаний опорно-поворотного устройства, который показал, что максимальная задействованная эффективная масса составляет 8,9% на 1 моде с частотой 163,11 Гц по оси X. Полученные результаты свидетельствуют о том, что устройство обладает достаточным запасом прочности.

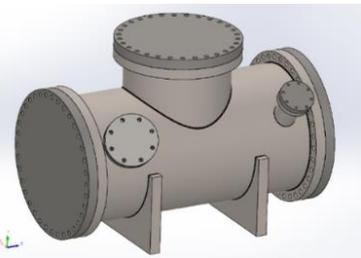
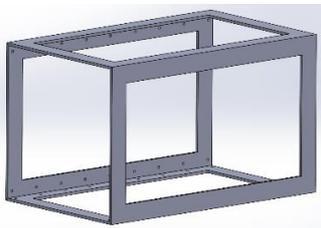
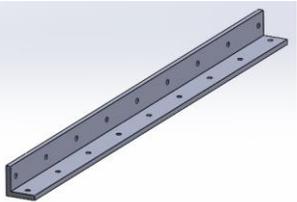
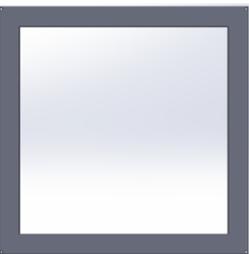
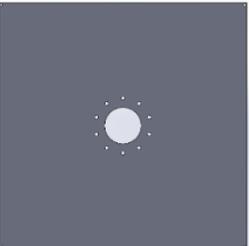
2.6 Расчет газовой нагрузки

Для осуществления расчета газовых нагрузок вакуумной системы, необходимо знать габаритные характеристики входящих в вакуумную камеру элементов, а также материалов, из которых они выполнены. В таблице 6 представлены основные характеристики элементов ВК. Значения характеристик, которые указаны в таблице 6, получены при проведении испытаний в САПР SolidWorks.

Величину потока газов находим по формуле:

$$Q_{\Sigma} = Q_{изд} + Q_{газ} + Q_{нат} \cdot \quad (16)$$

Таблица 6 – Элементы сменной корзины опорно-поворотного устройства и их характеристики

Вакуумная камера, и находящихся внутри нее устройства	Характеристики
<p>Вакуумная камера</p> 	<p>Масса = 48,56 кг; Внутренний диаметр камеры $D = 0,350$ м; Длина камеры $L = 0,698$ м; Диаметр верхнего патрубка = 0,293 м; Внутренний объем камеры $V = 0,067$ м³; Испытательное давление $P = 10^{-5}$ Па.</p>
<p>Литая рама</p> 	<p>Масса = 3,968 кг; Объем = 0,001 м³; Площадь поверхности = 0,282 м²; Материал: Сталь 12Х18Н10Т.</p>
<p>Накладка для теплоизоляции</p> 	<p>Масса = 0,557 кг; Объем = $6,967 \cdot 10^{-5}$ м³; Площадь поверхности = 0,064 м²; Материал: фторопласт-4.</p>
<p>Фиксирующая спутник рамка</p> 	<p>Масса = 0,284 кг; Объем = $3,554 \cdot 10^{-5}$ м³; Площадь поверхности = 0,048 м² Материал: 12Х18Н10Т.</p>
<p>Рамка с отверстием для крепления к валу</p> 	<p>Масса = 0,921 кг; Объем = 0,0001 м³; Площадь поверхности = 0,118 м² Материал: 12Х18Н10Т.</p>

Поток газов $Q_{изд}$, которые выделяются из испытываемого наноспутника, определим по формуле:

$$Q_{изд} = \frac{G \cdot q_{газ} \cdot \xi}{t_{откач}}, \quad (17)$$

где $G = 26$ кг – это масса испытываемого наноспутника;

$q_{газ} = 6 \cdot 10^{-6}$ м³·Па/м²с – это значение удельного газовыделения для алюминия;

$t_{откач} = 2,3$ часа = 8280 секунды – время, которое необходимо для получения давления 10^{-5} Па вакуумной камеры;

ξ выбирается в пределах от 1,5 до 3;

Используя вышеуказанные значения, получим:

$$Q_{изд} = \frac{26 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 3}{8280} = 0,019 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{м}^3 \text{ с}.$$

Вычислим поток газов $Q_{газ}$, которые выделяются с поверхностей компонентов вакуумной камеры. Стенки фланцев обозначим как днища.

$$Q_{газ} = Q_{обеч} + Q_{днищ1} + Q_{днищ2} + Q_{днищ3} + Q_{днищ4} + Q_{днищ5} + Q_{пат1} + Q_{пат2} + Q_{пат3} + Q_{констр} \quad (18)$$

Поток газов, которые выделяются с внутренней поверхности обечайки корпуса вакуумной камеры:

$$Q_{обеч} = \pi \cdot d \cdot h \cdot q_{обеч}, \quad (19)$$

где $q_{обеч} = 1,2 \cdot 10^{-8}$ м³·Па/м³с – это значение удельного газовыделения для нержавеющей стали;

$$d = 0,350 \text{ м};$$

$$h = 0,698\text{ м};$$

Подставим значения в выражение (19)

$$Q_{обеч} = \pi \cdot 0,350 \cdot 0,698 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,921 \cdot 10^{-8} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с};$$

Поток газов, которые выделяются с внутренней поверхности днища 1,2 (бокового фланца):

$$Q_{днищ12} = 2\pi \cdot R \cdot q_{днищ1}, \quad (20)$$

где $R = 0,175$ м;

$q_{днищ} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ м}^3 \text{ с}$ – это значение удельного газовыделения для нержавеющей стали;

$$Q_{днищ12} = 2\pi \cdot 0,175 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 1,319 \cdot 10^{-8} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Поток газов, которые выделяются с внутренней поверхности днища 3 (фланец для подключения откачного поста):

$$Q_{днищ3} = 2\pi \cdot R \cdot q_{днищ1}, \quad (21)$$

где $R = 0,051$ м;

$q_{днищ} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ м}^3 \text{ с}$ – это значение удельного газовыделения для нержавеющей стали;

$$Q_{днищ3} = 2\pi \cdot 0,051 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,385 \cdot 10^{-8} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Поток газов, которые выделяются с внутренней поверхности днища 4 (фланец со смотровым окном):

$$Q_{днищ4} = 2\pi \cdot R \cdot q_{днищ1}, \quad (22)$$

где $R = 0,066$ м;

$q_{\text{днищ}} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ м}^3 \text{ с}$ – удельное газовыделение для кварцевого стекла;

$$Q_{\text{днищ}4} = 2\pi \cdot 0,066 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,498 \cdot 10^{-8} \cdot \text{ м}^3 \cdot \text{ Па} / \text{ с}.$$

Поток газов, выделяющихся с внутренней поверхности днища 4 (верхний фланец):

$$Q_{\text{днищ}5} = 2\pi \cdot R \cdot q_{\text{днищ}1}, \quad (23)$$

где $R = 0,146 \text{ м}$;

$q_{\text{днищ}} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ м}^3 \text{ с}$ – удельное газовыделение для кварцевого стекла;

$$Q_{\text{днищ}5} = 2\pi \cdot 0,146 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 1,101 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{ Па} / \text{ с}.$$

Поток газов, выделяющихся с патрубка 1 (верхний фланец):

$$Q_{\text{пат}1} = \pi \cdot d \cdot h \cdot q_{\text{обеч}}, \quad (24)$$

где $q_{\text{пат}1} = 1,210^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{ Па} / \text{ с}$ – это значение удельного газовыделения для нержавеющей стали;

$$d = 0,293 \text{ м};$$

$$h = 0,142 \text{ м};$$

Подставим вышеуказанные значения в формулу (16)

$$Q_{\text{пат}1} = \pi \cdot 0,293 \cdot 0,142 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,157 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{ Па} / \text{ с}.$$

Поток газов, которые выделяются с патрубка 2 (фланец для подключения откачного поста):

$$Q_{\text{пат}2} = \pi \cdot d \cdot h \cdot q_{\text{обеч}}, \quad (25)$$

где $q_{nam2} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$ – это значение удельного газовыделения для нержавеющей стали;

$$d = 0,048 \text{ м};$$

$$h = 0,088 \text{ м};$$

Подставим вышеуказанные значения в формулу (18)

$$Q_{nam2} = \pi \cdot 0,293 \cdot 0,142 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,157 \cdot 10^{-8} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Газовый поток, который выделяется с патрубка 3 (фланец со смотровым окном):

$$Q_{nam3} = \pi \cdot d \cdot h \cdot q_{обеч}, \quad (26)$$

где $q_{nam3} = 1,2 \cdot 10^{-8} \cdot \text{м}^3 \text{Па} / \text{м}^3 \text{с}$ – это значение удельного газовыделения для нержавеющей стали;

$$d = 0,135 \text{ м};$$

$$h = 0,115;$$

Подставим вышеуказанные значения в формулу (19)

$$Q_{nam3} = \pi \cdot 0,135 \cdot 0,115 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,059 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Поток газов, выделяющихся с поверхности фиксирующей корзины:

$$Q_{констр} = S_{констр} + q_{констр}, \quad (27)$$

где $S_{констр} = 0,704 \text{ м}^2$ – площадь поверхности конструкции;

$$q_{констр} = 1,2 \cdot 10^{-8} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с} \text{ – удельное газовыделение нержавеющей стали.}$$

Подставим значения в выражение (20):

$$Q_{констр} = 0,704 + 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,845 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Поток газов, выделяющихся с поверхности инфракрасных ламп:

$$Q_{\text{лампы}} = S_{\text{лампы}} + q_{\text{стекло}}, \quad (28)$$

$$S_{\text{лампы}} = 2\pi R(h + R) - \text{это величина площади поверхности отражателя}; \quad (29)$$

$q_{\text{стекло}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{м}^2 \text{ с}$ – это значение удельного газовыделения для поверхности ламп.

Подставим полученные значения в выражение (21), учтем, что необходимо установить инфракрасные лампы, мощность которых – 500 Вт, диаметром и длиной – 140 мм:

$$Q_{\text{лампы}} = 9,236 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 1,847 \cdot 10^{-2} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Вычислим поток газов по формуле (23)

$$\begin{aligned} Q_{\text{газ}} &= 0,921 \cdot 10^{-8} + 1,319 \cdot 10^{-8} + 1,319 \cdot 10^{-8} + 0,385 \cdot 10^{-8} + 0,498 \cdot 10^{-8} + \\ &+ 1,101 \cdot 10^{-8} + 0,157 \cdot 10^{-8} + 0,157 \cdot 10^{-8} + 0,059 \cdot 10^{-8} + 0,845 \cdot 10^{-8} = \\ &= 0,068 \cdot 10^{-6} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}. \end{aligned}$$

Рассчитаем газовый поток через неплотности в соединениях камеры. Число вероятных мест натекания – $n = 6$.

$$Q_{\text{нат}} = n \cdot \gamma = 6 \cdot 2 \cdot 10^{-12} = 12 \cdot 10^{-12} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}. \quad (30)$$

Суммарный газовый поток вычислим по формуле (16)

$$Q_{\Sigma} = 0,019 \cdot 10^{-6} + 0,068 \cdot 10^{-6} + 12 \cdot 10^{-12} = 0,000882 \cdot 10^{-8} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Таким образом, в результате расчета газовой нагрузки был определен суммарный газовый поток, равный $0,000882 \cdot 10^{-8} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$.

2.7 Операционно-технологическая карта

Операционно-технологическая карта по загрузке испытываемого наноспутника в спроектированный стенд для тепловакуумных испытаний представлена в таблице 7.

Таблица 7 – Операционно-технологическая карта спроектированного стенда для тепловакуумных испытаний

Номер перехода	Содержание перехода	Особые указания
Общие требования техники безопасности		
1	К выполнению работ со стендом допускаются сотрудники, изучившие правила техники безопасности при работах с электрическим оборудованием, прошедшие обучение, обладающие практическими навыками по работе	Каждый сотрудник должен быть аттестован по эксплуатации оборудования
2	При работе со стендом нахождение посторонних лиц строго запрещено	
3	Перед началом работ необходимо провести проверку знаний по технике безопасности: - правил техники безопасности при работе с электрическим оборудованием; - правил пожарной безопасности	Подготовить места, предназначенные для складирования материалов, инвентаря и иного необходимого оборудования.
Исходное состояние спроектированного стенда		
4	Электрическое снабжение системы отключено	
5	Давление внутри вакуумной камеры равно атмосферному	
6	Фланцы с гермовводами вакуумной камеры сняты	
7	В криогенных экранах отсутствует жидкий азот	
8	Фланец со смотровым стеклом в собранном состоянии	
9	Рамка, фиксирующая спутник внутри рамной конструкции, выдвинута	
10	Рамка с закреплением вала опорно-поворотного устройства в собранном состоянии	
11	Механизм вакуумного уплотнения для ввода движения в собранном состоянии	
12	Механизмы для передачи движения на вал опорно-поворотного устройства, в собранном состоянии	
13	Откачной пост не подключен к тепловакуумной камере	
Порядок загрузки наноспутника в вакуумную камеру спроектированного стенда		
14	Спутник помещается в рамную корзину опорно-поворотного устройства и фиксируется рамкой	Перед началом пуско-наладочных работ необходимо убедиться в отсутствии электрического снабжения системы

Номер перехода	Содержание перехода	Особые указания
Порядок загрузки наноспутника в вакуумную камеру спроектированного стенда		
15	Фланец, через отверстие которого проходит вал опорно-поворотного устройства, задвигается и фиксируется болтовыми соединениями к тепловакуумной камере	
16	Производится снабжение полой стенки испытательной вакуумной камеры жидким азотом	При подаче жидкого азота следует ориентироваться по показаниям температурного датчика
17	Верхний фланец с гермовводами фиксируется болтовыми соединениями к испытательной вакуумной камере	
18	Откачной пост подключается к тепловакуумной камере	
19	Производится вакуумирование испытательной камеры	
20	Производится подключение к сети элементов интерфейса связи	
21	Производится подключение шаговых двигателей к сети, а также посредством драйверов, к управляющим элементам	
22	При помощи шаговых двигателей производится программно заданное вращательное и линейное перемещение спутника внутри камеры во время проведения эксперимента	
23	При помощи интерфейса связи производят прием телеметрии со спутника	
Порядок извлечения наноспутника в вакуумную камеру спроектированного стенда		
24	Отключение электрического снабжения	
25	Перекрыть вентиль откачного поста	
26	Отключить откачной пост	
27	Медленно открывая вентиль напустить в вакуумную камеру атмосферный воздух	В процессе напуска атмосферного воздуха следует ориентироваться по показаниям манометра
28	После того, как давление внутри камеры стало равным атмосферному, снимается боковой фланец с гермовводами, содержащий отверстие для вала опорно-поворотного устройства	
29	Снимается фиксирующая рамка	

Продолжение таблицы 7

Номер перехода	Содержание перехода	Особые указания
Порядок извлечения наноспутника в вакуумную камеру спроектированного стенда		
30	Спутник вынимают из рамной конструкции опорно-поворотного устройства	Перед началом разгрузки необходимо убедиться в том, что температура испытываемого спутника равна комнатной
31	На основе проведенного испытания составляется акт	

3 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данном разделе приводятся затраты на проектирование и изготовление стенда для тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat.

Для того, чтобы провести расчет изготовления спроектированного стенда, необходимо рассчитать затраты на:

- этап проектирования стенда;
- материалы для изготовления компонентов стенда;
- приобретение компонентов, не требующих изготовления под заказ;
- затраты на обслуживание стенда (замены деталей по мере износа, потребляемую электроэнергию, заправку криогенного экрана жидким азотом).

Расчет проводится с учетом того, что проектирование и дальнейшая эксплуатация будут проходить в рамках действующего предприятия.

Себестоимость спроектированного стенда включает в себя следующие затраты:

- основная и дополнительная заработная плата разработчиков и обслуживающего персонала;
- страховые взносы;
- расходные материалы;
- накладные расходы.

Для проектирования стенда необходимы следующие ПО и расходные материалы:

1. Программное обеспечение (ПО) MS Office 2016.
2. КОМПАС-3D 2020.
3. SOLIDWORKS Professional Term License.
4. Бумагу для принтера.
5. Тонер для принтера лазерного Xerox Phaser 3020.
6. Канцелярские принадлежности.

Итоговые затраты на расходные материалы при проектировании указаны в таблице 8.

Таблица 8 – Затраты на ПО и расходные материалы

Материал	Цена за шт., руб.	Итоговая сумма, руб
ПО MS Office 2016	6100	6100
КОМПАС-3D v20	8500	8 500
SOLIDWORKS Professional Term License	10940	10940
Бумага для принтера	1200	1200
Тонер для принтера	380	380
Канцелярские принадлежности	—	250
Итого:		27370

Расчет затрат на заработную плату обслуживающего стенд для ТВИ персонала производится на основании:

- этапов работ по проектированию стенда, а также их продолжительности;
- уровня трудоемкости процесса;
- заработной платы обслуживающего персонала.

Под трудоемкостью процесса подразумеваются временные затраты на работу, на производство единицы продукции. Единицей измерения труда, который затрачен на каждый из этапов проектирования, является человеко-месяц. В месяце без учета праздничных дней 21-22 рабочих дня. День, который был затрачен на каждый этап проектирования, равен 8 часам.

В таблице 9 представлены затраты на пуско-наладочные работы.

Таблица 9 – Расчет затрат на пуско-наладочные работы

Этап проектирования	Трудоемкость этапа проектирования, чел/день	Трудоемкость этапа проектирования, чел/месяц	Заработная плата, руб.	Итоговые затраты по заработной плате, руб.
Составление и согласование ТЗ	1	0,045	30000	1350

Продолжение таблицы 9

Этап проектирования	Трудоемкость этапа проектирования, чел/день	Трудоемкость этапа проектирования, чел/месяц	Заработная плата, руб.	Итоговые затраты по заработной плате, руб.
Рассмотрение соответствующей литературы	3	0,136	30000	4080
Составление эскизного проекта	6	0,273	30000	8190
Составление чертежей	12	0,546	30000	16380
Составление маршрутной и операционной технологии работы	8	0,364	30000	10920
Составление технической документации	13	0,591	30000	17730
Проектирование электронных схем	10	0,455	45000	22750
Разработка ПО для управления ШД	8	0,364	70000	25480
Руководство работой над созданием документации	9	0,409	55000	22495
Руководство работой при установке и наладке стенда	10	0,455	55000	25025
Сборка компонентов стенда	13	0,591	60000	35460
Отладка и настройка электронной части систем стенда	8	0,364	45000	16380
Итого:				206240

Дополнительная заработная плата проектировщиков составляет 20% от доли основной заработной платы, и находится по формуле:

$$\Phi_{\text{доп}} = \frac{206240 \cdot 20\%}{100\%} = 41248 \text{ руб.}$$

Страховые взносы составляют 30,2% от суммы общей заработной платы проектировщиков, и рассчитываются по формуле:

$$CB = \frac{(206240 + 412248) \cdot 30,2\%}{100\%} = 74741,376 \text{ руб.}$$

В сумму прочих расходов входит оплата машинного времени на проектирование ВК, а также разработку технической документации. Прочие расходы рассчитываются по формуле:

$$Z_{np} = N \cdot C_{мч} \cdot K_{загр}, \quad (28)$$

где N – количество часов, которое будет затрачено на проектирование стенда и разработку технической документации;

$C_{мч}$ – цена машино-часа, которая включает в себя цену за профилактические работы, потребляемую электроэнергию, расходные материалы. $C_{мч}$ равна 50 руб.;

$K_{загр}$ – коэффициент загрузки ПЭВМ. $K_{загр} = 0,7-0,9$.

По таблице 8 рассчитаем величину N с учетом дней, затраченных на выполнение каждого из этапов. Длительность каждого дня примем равным 8 часам:

$$N = (1 + 3 + 6 + 12 + 8 + 13 + 10 + 8 + 9 + 10 + 13 + 8) \cdot 8 = 808 \text{ часа},$$

$$Z_{np} = 808 \cdot 50 \cdot 0,7 = 28280 \text{ руб.}$$

Занесем в таблицу 10 значения затрат на расходные материалы, заработные платы обслуживающего персонала (основную и дополнительную), затраты на страховые взносы, накладные расходы, а также прочие расходы.

Таблица 10 – Себестоимость проектирования стенда для ГВИ

Этап	Суммарные затраты, руб.
Затраты на расходные материалы	27370
Затраты на заработные платы обслуживающего персонала (основную и дополнительную)	247488
Затраты на страховые взносы	74741,376
Прочие расходы	28280
Итого:	377879,37

Корпус ВК будет выполняться из стали марки 12Х18Н10Т, стоимостью 268 р. за кг. Масса корпуса ВК составляет 48,56 кг. Итого расход на материал для изготовления корпуса равен 13014,08 руб. Стоимость работ по изготовлению на предприятии составят 384400 руб.

Стоимость компонентов, необходимых для изготовления стенда для ТВИ приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Затраты на изготовление стенда для ТВИ

Название компонента стенда для ТВИ	Кол-во	Стоимость, руб.	Итоговая сумма, руб.
ВК	1	384400	384400
Вакуумметр ВДГ-1	1	42806	42806
Опоры ВК	2	5700	11400
Верхний фланец с гермовводами	1	117400	117400
Медная прокладка к верхнему фланцу с гермовводами	1	8340	8340
Боковой фланец с гермовводами	1	191100	191100
Медная прокладка к боковому фланцу с гермовводами	1	16700	16700
Боковой фланец с отверстием для вала опорно-поворотного устройства	1	191100	191100
Медная прокладка к боковому фланцу с отверстием для вала опорно-поворотного устройства	1	16700	16700
Фланец со смотровым окном	1	214400	214400
Патрубок к фланцу со смотровым окном	1	99900	99900
Медная прокладка к фланцу со смотровым окном	1	3880	3880
Фланец с вентилем для подключения откачного поста	1	93700	93700
Патрубок к фланцу с вентилем для подключения откачного поста	1	11900	11900
Медная прокладка к фланцу с вентилем для подключения откачного поста	3	1550	4650
Фланец со смотровым стеклом на торце внутреннего вала	1	13500	13500
Фланец на торце внешнего вала	1	9800	9800
Уплотнение фланца на торце внешнего вала	1	4300	4300

Продолжение таблицы 11

Название компонента стенда для ТВИ	Кол-во	Стоимость, руб.	Итоговая сумма, руб.
Шаговый двигатель	1	56 339	56 339
Внешний вал	1	24500	24500
Подшипник для внешнего вала	2	1 890	3780
Внутренний вал	1	29500	29500
Кожух для подшипника на внешнем валу	1	1430	1430
Опора для внешнего вала	1	3540	3540
Кожух для подшипника внутреннего вала	1	1250	1250
Подшипник для внутреннего вала	2	1 790	3580
Вакуумный герметичный ввод движения	1	76300	76300
Шестерня механизма для передачи вращательного перемещения на валу опорно-поворотного устройства	1	1580	1580
Шестерня механизма для передачи вращательного перемещения на валу шагового двигателя	1	3760	3760
Винт механизма для передачи линейного перемещения	1	2852	2852
Гайка механизма для передачи линейного перемещения	1	1465	1465
Кожух для интерфейсной панели	1	1320	1320
Откачной пост Pfeiffer Vacuum HiCube 80 Eco	1	1500000	1500000
Итого			4062271,33

Таким образом, округляя, затраты на ПО и расходуемые материалы составили 27370 рублей, затраты на пуско-наладочные работы – 206240 рублей, себестоимость проектирования стенда для ТВИ – 377879 рублей, затраты на изготовление стенда – 4 062 271 рублей

Общая стоимость изготовления стенда для ТВИ с учетом всех затрат составила 4673760 рублей.

4 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Тепловакуумные испытания, проводимые в специальных стендах, характеризуют как трудные и опасные. Это обусловлено проведением работ с сосудами, которые находятся под давлением, подвижными механизмами. Работы ведутся также с различными газами, высокими и низкими температурами, а также электрическим током.

Целью данного раздела является описание правил обеспечения безопасности обслуживающего персонала при эксплуатации тепловакуумного стенда.

4.1 Общие требования техники безопасности

К эксплуатации тепловакуумных стендов, согласно Приказу Минтруда России от 15.12.2020 N 903н "Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок", допускаются сотрудники, достигшие совершеннолетия и прошедшие:

- соответствующее обучение;
- вводный и первичный инструктажи по охране труда;
- обучение безопасным методам и приемам работы;
- проверку знаний требований охраны труда;
- обучение правилам соблюдения пожарной безопасности;
- обучение правилам соблюдения электробезопасности.

Во время работ с тепловакуумными стендами сотрудники обязаны:

- соблюдать правила техники безопасности, а также соблюдать правила охраны окружающей среды;
- заботиться о собственной безопасности, а также о безопасности персонала;
- соблюдать все требования пожарной безопасности;
- знать где находится аптечка, а также иметь навыки оказания первой помощи пострадавшему;

- четко знать порядок действий при возникновении чрезвычайных ситуаций;

- знать устройство стенда для тепловакуумных испытаний, принцип его работы и обслуживания.

При проведении работ за стендом категорически запрещается отвлекаться на посторонние действия и отвлекать сотрудников. Запрещается употреблять напитки, вызывающие алкогольное опьянение.

При возникновении каких-либо нештатных ситуаций необходимо докладывать руководителю работ. При обнаружении поломки и неисправной работы оборудования необходимо немедленно сообщить руководителю работ.

4.2 Средства индивидуальной защиты

Для выполнения работ за стендом необходимо обеспечить обслуживающий персонал средствами индивидуальной защиты.

Так как в состав данного стенда входит электрооборудование, то согласно Приказу Минтруда России от 15.12.2020 N 903н "Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок", средства индивидуальной защиты должны включать в себя элементы, указанные в таблице 12.

Таблица 12 – СИЗ при работе с электрооборудованием

Средство индивидуальной защиты	Нормативный документ
Указатели напряжения	ГОСТ 20493-90
Слесарно-монтажный инструмент с пластмассовыми ручками	ГОСТ 11516-79
Диэлектрические перчатки	ТУ 38.106359-79
Электроизмерительные клещи	ГОСТ 9071-68
Электроизмерительные штанги	ГОСТ 20494-2001

Также эксплуатация данного стенда подразумевает использование жидкого азота, поэтому, согласно Приказ Минтруда России от 18.12.2020 N 928н "Об утверждении Правил по охране труда в медицинских организациях",

средства индивидуальной защиты при работе с жидким азотом должны включать в себя элементы, указанные в таблице 13.

Таблица 13 – СИЗ при работе с жидким азотом

Средство индивидуальной защиты	Нормативный документ
Защитные очки с боковыми накладками	ГОСТ12.4.013-97
Защитные рукавицы	ГОСТ 20010-93
Халат хлопчатобумажный	ГОСТ 12.4.131-83, ГОСТ 12.4.132-83

Средства защиты должны быть пригодны для использования и соответствовать размеру работника. Категорически запрещается использовать СИЗ, целостность которых нарушена, либо истек срок годности.

4.3 Требования техники безопасности при работе с вакуумным оборудованием

Перед началом работ за испытательным тепловacuумным стендом в первую очередь необходимо проверить исправность СИЗ. Волосы необходимо заправить под головной убор. В карманах не должно быть острых предметов. Все ювелирные украшения необходимо снять. Работы выполняются в закрытой обуви.

При осмотре рабочего места сотрудник обязан устранить предметы, создающие помехи работе. Необходимо убедиться в исправности системы вентиляции, а также в хорошей освещаемости. Проверить пути эвакуации, наличие средств пожаротушения, а также наличие аптечки. Убедиться в исправности электропроводки, элементов вакуумной системы, измерительных приборов. Также перед началом работ необходимо убедиться в исправности фиксации оборудования и защитных кожухов.

При обнаружении каких-либо неисправностей необходимо сообщить об этом своему непосредственному руководителю и до их устранения к работе не приступать. Допустимо выполнять только работы, по которым пройдено соответствующее обучение, и также получен инструктаж.

На протяжении рабочего дня необходимо поддерживать чистоту на рабочем месте, не загромождать подходы к рабочему месту. При выполнении работ обязательно нужно контролировать процесс, располагаться таким образом, чтобы обезопасить себя от опасных производственных факторов.

При проведении работ нужно контролировать за исправность всех компонентов стенда для тепловакуумных испытаний.

При работе с тепловакуумными стендами запрещается:

- подпускать к своей работе и своему рабочему месту посторонних лиц;
- допускать контактов мокрыми руками с электрооборудованием;
- натягивать и перекручивать сетевой шнур;
- производить техническое обслуживание и ремонт тепловакуумного стенда, а также снимать элементы корпуса вакуумной камеры, пока внутри нее давление отлично от атмосферного;

- использовать компоненты стенда для тепловакуумных испытаний не по прямому назначению или при наличии разного рода неисправностей;

- использовать неисправное электрооборудование;
- работать без необходимых СИЗ;
- принимать пищу на рабочем месте.

При ухудшении самочувствия необходимо прекратить работу, известить руководителя работ и обратиться за медицинской помощью.

По завершению работ с тепловакуумным стендом необходимо:

- выключить компоненты испытательного тепловакуумного стенда, и отключить их от электросети;

- промыть внутреннюю поверхность испытательной вакуумной камеры;
- привести в порядок свое рабочее место;

- снять СИЗ, проверить на наличие неисправностей и убрать в специально отведенное место;

- промыть руки и лицо с мылом;

- донести до руководителя работ обо всех нарушениях и замечаниях, выявленных в процессе работы, и принятых мерах по их устранению.

4.4 Порядок действий при возникновении аварийных ситуаций

В случае возникновения каких-либо неполадок тепловакуумного стенда, необходимо:

- немедленно прекратить работы, отключить стенд от электросети;
- доложить руководителю работ;
- действовать согласно полученным указаниям.

При обнаружении на металлических частях оборудования напряжения, необходимо отключить оборудование от сети и доложить своему руководителю. При обнаружении дыма и возникновении пожара немедленно объявить пожарную тревогу, принять меры к ликвидации пожара с помощью имеющихся первичных средств пожаротушения, поставить в известность своего руководителя. При необходимости вызвать пожарную бригаду.

Запрещается применять воду и пенные огнетушители для тушения электропроводок, а также оборудования под напряжением.

В условиях задымления и наличия огня в помещении нужно передвигаться вдоль стен, согнувшись или ползком; для облегчения дыхания рот и нос прикрыть платком (тканью), смоченной водой; через пламя передвигаться, накрывшись с головой верхней одеждой или покрывалом, по возможности облить водой, загоревшуюся одежду сорвать или погасить.

При несчастном случае немедленно освободить пострадавшего от действия травмирующего фактора, соблюдая собственную безопасность, оказать пострадавшему первую помощь, при необходимости вызвать бригаду скорой помощи. По возможности сохранить обстановку, при которой произошел несчастный случай, если это не угрожает жизни и здоровью окружающих, для проведения расследования причин возникновения несчастного случая, или зафиксировать на фото или видео. Сообщить своему руководителю и специалисту по охране труда.

В случае ухудшения самочувствия, появления рези в глазах, резком ухудшении видимости – невозможности сфокусировать взгляд или навести его на резкость, появлении боли в пальцах и кистях рук, усилении сердцебиения

немедленно покинуть рабочее место, сообщить о произошедшем своему руководителю и обратиться в медицинское учреждение.

Таким образом, в данной главе были рассмотрены основные правила и требования по технике безопасности обслуживающего стенд для ТВИ персонала, а также изучен порядок требований и перед началом работы за стендом, и по окончании работы. Рассмотрен порядок действий при возникновении аварийных и нестандартных ситуаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках выполнения данной выпускной квалификационной работы, в её первой части, были изучены теоретические сведения о наноспутниках стандарта CubeSat. Также изучены сведения о факторах космического пространства, необходимые для понимания условий, в которых функционируют наноспутники. Рассмотрен принцип работы тепловакуумных испытательных стендов, их компонентов, вакуумной арматуры и конструкционные материалы, применяемые при изготовлении вакуумной техники. Произведен обзор основных САПР, используемых при проектировании технологического оборудования, благодаря чему были определены наиболее подходящие из них: для моделирования стенда и построения 2D чертежей - САПР Компас-3D, а для проведения статического исследования и частотного анализа - САПР SolidWorks.

Во второй части бакалаврской работы было составлено техническое задание на проектирование стенда. Выполнено моделирование стенда средствами САПР Компас-3D. Приведено техническое описание спроектированного стенда и его работы, согласно которому основным компонентом стенда стала испытательная вакуумная камера, внутрь которой помещается фиксирующая корзина со спутником. Движение корзины внутри камеры обеспечивается за счет механизмов, выполненных на внешнем валу, и механически соединенных с шаговыми двигателями. Спроектированный стенд позволяет проводить ТВИ спутников стандарта CubeSat формата от 1U до 12U. Условия, в которых проводятся испытания, максимально имитируют натурные. Посредством разработанного оптического интерфейса связи обеспечивается информационное взаимодействие оператора с наноспутником, например, прием телеметрии.

В работе подробно описано устройство и принцип работы механизмов для передачи движения сменной корзине со спутником внутри вакуумной камеры. Для обеспечения вращательного перемещения был выбран механизм с зубчатой

передачей, в котором вращение от вала двигателя передается посредством двух шестерней. Для обеспечения линейного перемещения за основной принят механизм с шарико-винтовой передачей, который позволяет преобразовать вращательное движение винта, расположенного на валу двигателя, в линейное перемещение посредством гайки, соединенной с фиксатором, расположенным на валу опорно-поворотного механизма. Для передачи движения были выбраны шаговые двигатели типа 3PL130H318-D24.

Особое внимание в работе уделено устройству вакуумного уплотнения для обеспечения герметичности ввода при движении вала с фиксирующей корзиной внутри ВК. Основными элементами устройства, обеспечивающими герметичность, стали особые уплотнительные прокладки. В самой фиксирующей корзине предусмотрены накладки из фторопласта-4, предназначенные для того, чтобы максимально снизить теплоотвод от испытываемого спутника к элементам опорно-поворотного устройства.

В работе выполнен расчет габаритных размеров спроектированного стенда, по результатам которого были определены: оптимальный внутренний диаметр вакуумной камеры – 0,35 м и её объём - 0,067 м³, толщина внешней – 2 мм и внутренней – 4 мм стенок. Для опорно-поворотного устройства подобран размер в соответствии со стандартными габаритными размерами спутника формата CubeSat 12U, толщина рамной конструкции при этом составила 4 мм.

В третьей части выпускной квалификационной работы представлен расчет стоимости изготовления и пуско-наладочных работ стенда. Согласно расчету, затраты на ПО и расходуемые материалы составили 27370 рублей, затраты на пуско-наладочные работы – 206240 рублей, себестоимость проектирования стенда для ТВИ – 377879 рублей, а затраты на изготовление стенда – 4 062 271 рублей. Общая стоимость изготовления стенда для ТВИ с учетом всех затрат составила – 4673760 рублей.

В четвертой части работы были рассмотрены основные правила и требования по технике безопасности обслуживающего персонала стенда для ТВИ, а также изучен порядок требований перед началом работы со стендом и по

окончании работы с ним. Рассмотрен порядок действий при возникновении аварийных и нештатных ситуаций.

На спроектированный стенд был получен патент на изобретение №2772156 от 18.05.2022г (Приложение Г).

Данная разработка проходила апробацию в рамках российских и зарубежных конференций и форумов:

- XIX региональная научная конференция «Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование - 2021»;

- XXIII региональная научно-практическая конференции «Молодежь XXI века: шаг в будущее - 2022»;

- Первый российско-китайский молодёжный форум научно-технических и инновационных достижений - 2022;

- XXXI научной конференции «День науки - 2022» (2 место на секции);

- Образовательная программа по развитию проектной деятельности и предпринимательства для студентов Дальнего Востока «Дальневосточный старт 2021-2022» (финалист);

- Питч-сессия «Проекты будущего - 2021».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1) Введение в ракетно-космическую технику. Учебное пособие. Том 1. / А. П. Аверьянов, Л. Г. Азаренко, Г. Г. Вокин, Н. А. Кашеев, Л. А. Мачнева, В. С. Чаплинский. – М.: Инфра–Инженерия, 2018. – 380 с.

2) Введение в ракетно-космическую технику. Учебное пособие. Том 2. / А. П. Аверьянов, Л. Г. Азаренко, Г. Г. Вокин, Н. А. Кашеев, Л. А. Мачнева, В. С. Чаплинский. – М.: Инфра-Инженерия, 2018. – 444 с.

3) Разработка систем космических аппаратов / Под ред. П. Фортескью, Г. Суайнерда, Д. Старка; Пер. с англ. – М.: Альпина Паблишер, 2019. – 764 с.

4) Расчёт вакуумных систем: учебное пособие / А.В. Юрьева. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 114 с.

5) Иванов В.И. Вакуумная техника: Учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 129 с.

6) Шатохин, В. Л. Вакуумная техника: лабораторный практикум: учебное пособие / В. Л. Шатохин, В. П. Шестак. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2010. – 84 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/75757> – 11.10.2021.

7) Экспериментальные методы физики твердого тела: учеб. пособие / Д. В. Фомин ; АмГУ. – Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2014. – 185 с.

8) Цаплин, С.В. Теплообмен в космосе: учеб. пособие / С.В. Цаплин, С.А. Болычев, А.Е. Романов. – Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2018. – 92 с.

9) Компания ООО «ЭРСТВАК» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.erstvak.com/> – 15.12.2021.

10) Научно-производственная компания «АВАКС»: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://avacuum.ru/> – 14.01.2022.

11) Абламейко, С. В. Малые космические аппараты: пособие для студентов факультетов радиофизики и компьютер. технологий, мех.-мат. и геогр. / С. В. Абламейко, В. А. Саечников, А. А. Спиридонов. – Минск : БГУ, 2012. – 159 с.

12) Храмов, Д.А. Миниатюрные спутники стандарта «CUBESAT» // Космическая наука и технология. 2009. – №3. – с.20-31

13) Ключников В.Ю. Наноспутники – наиболее перспективный класс малых космических аппаратов / Инноватика и экспертиза // В.Ю. Ключников, Клементьев С.А. – №2(17). – 2016. – с. 97-105

14) Сайт проекта ГК «Геоскан» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geoscan.aero/ru/products/cubesat> – 16.01.2022.

15) Никольский, В. В. Проектирование сверхмалых космических аппаратов : учебное пособие / В. В. Никольский. – Санкт-Петербург : БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2012. – 59 с.

16) ГОСТ Р 56519-2015. АППАРАТЫ КОСМИЧЕСКИЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ. ТЕПЛОВАКУУМНАЯ ОТРАБОТКА

17) Ярмонов, А. Н. Вакуумные технологии: учебное пособие / А. Н. Ярмонов. – Пермь: ПНИПУ, 2015. – 306 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/160773> – 01.02.2022.

18) Демихов, К. Е. Вакуумные системы: учебное пособие / К. Е. Демихов, Н. К. Никулин. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 76 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/52177> – 01.02.2022.

19) Розанов, Л. Н. Вакуумная техника: учебное пособие для вузов по специальности «Вакуумная техника». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. – 1991. – 320с

20) Сайт аэрокосмического подразделения компании New Production Concept – Spacemind [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.npcspacemind.com/solutions/nanosatellite-hardware/cubesat-structure/sm12-12u/>

21) Туркина, Н. Р. Проектирование в среде SolidWorks : учебное пособие / Н. Р. Туркина. – Санкт-Петербург : БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2017. —

55 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/121879> – 16.02.2022.

22) Алаева, Т. Ю. Инструментальные средства программирования. Компас-3D : учебно-методическое пособие / Т. Ю. Алаева. — пос. Караваево : КГСХА, 2020. – 62 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/171659> – 16.02.2022.

23) Черняева, Н. Н. Инженерная и компьютерная графика. Лабораторный практикум в среде Autocad : учебное пособие / Н. Н. Черняева. – Вологда : ВоГУ, 2014. – 88 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/93067> – 18.02.2022.

24) Вакуумные системы и их элементы: Справочник-атлас / Е. С. Фролов и др., М.: Машиностроение, 1968. – 200 с.

25) ГОСТ 14249-89 Расчет цилиндрических обечаек на прочность.

26) Сайт компании «Pfeiffer Vacuum Technology AG» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/> – 20.02.2022.

27) Базиненков, А. М. Технические средства получения и измерения давления вакуумной технологической среды : методические указания / А. М. Базиненков, А. Т. Каменихин. — 2-е изд. — Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 64 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/204926> – 10.05.2022.

28) Сайт Информационного портала "ОХРАНА ТРУДА В РОССИИ" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/instructions/166/148786/ – 12.05.2022.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

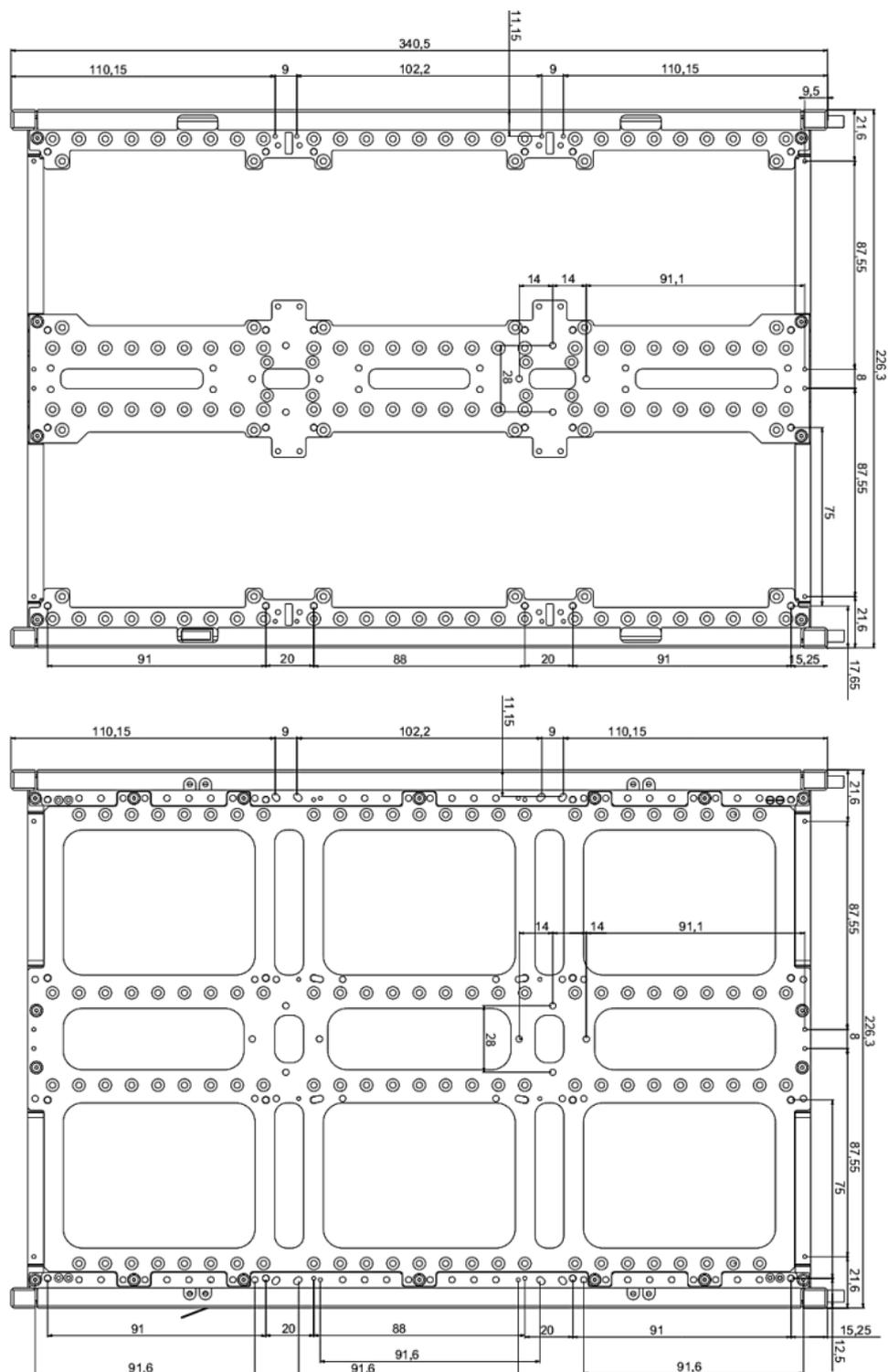


Рисунок А.1 – Стандартные размеры спутника стандарта CubeSat 12U [14]

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

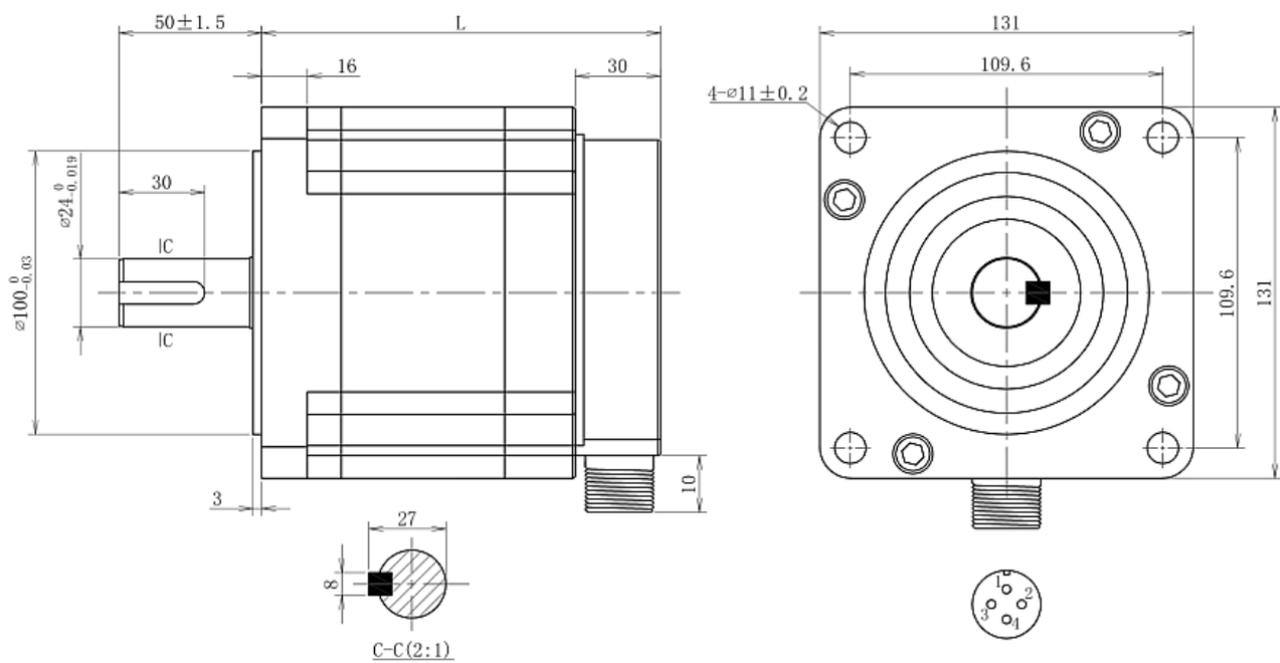


Рисунок Б.1 – Габаритные размеры шагового двигателя

ПРИЛОЖЕНИЕ В

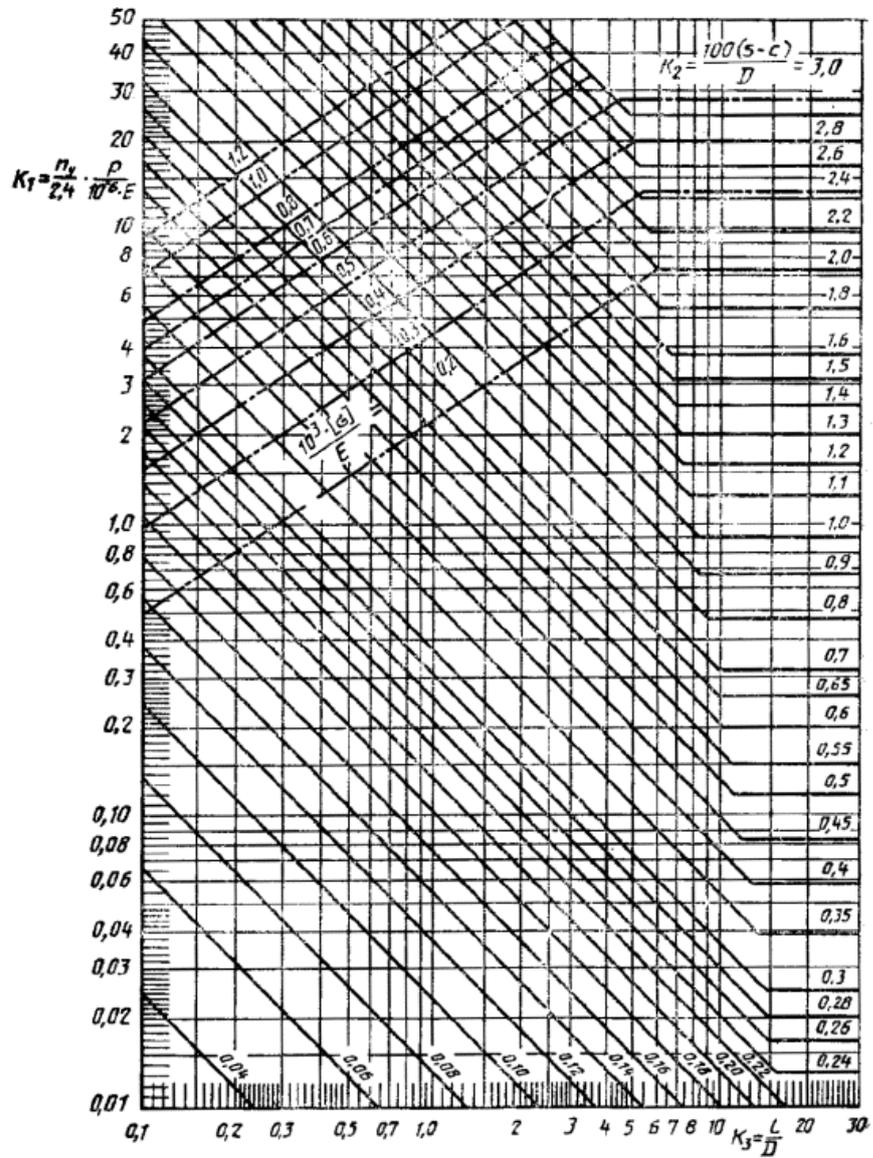


Рисунок В.1 – Номограмма для расчета на устойчивость в пределах упругости цилиндрических обечаек, работающих под наружным давлением [6]

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



Рисунок Г.1 – Патент на изобретение «Стенд для тепловакуумных испытаний спутников стандарта CubeSat с интерфейсом связи