**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | |  | |  | | ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ: | | | | | | | | | |
| **Факультет** | | И | | Заведующий кафедрой | | | | |  | | И1 | | |
|  | |  | |  | | | | |  | | шифр кафедры | | |
| **Выпускающая кафедра** | | И1 | | Борейшо А.С. | | |  |  | | | | | |
|  | |  | | Фамилия И.О. | | |  | подпись | | | | | | |
| **Группа** | | И144 | | «\_\_\_\_\_» | |  | | | | | | 201\_\_\_ г. | |
|  |  | |  | |  | |  | | | | |  | | |

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

|  |  |
| --- | --- |
| Путалова Игоря Глебовича | |
| Фамилия, имя, отчество обучающегося | |
| **На тему** | Разработка стенда для исследования зарядки пылевых |
| макрочастиц короткими лазерными импульсами | |
|  | |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Направление подготовки** | 12.03.03 |  | Фотоника и оптоинформатика |
|  | индекс направления |  | полное наименование направления |
|  | | |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Консультант:** | | | | |  | | | |  | **Руководитель:** | | |  | | | | | | |
| при необходимости | | | | | подпись | | | |  |  | | | подпись | | | | | | |
| Ассистент | | |  | | Сергеев А.А. | | | |  | Профессор | | | | |  | | Борейшо А.С. | | |
| ученая степень, ученое звание | | | | | Фамилия ИО | | | |  | ученая степень, ученое звание | | | | | | Фамилия ИО | | | |
| « » |  |  | | | | |  | 201\_\_г. |  | « » |  |  | | | | | |  | 201\_\_г. |
|  | | | | | |  | | |  | **Обучающийся:** | | | |  | | | | | |
|  | | | |  | |  | | |  |  | | | | |  | | Путалов И.Г. | | |
|  | | | | | |  | | |  | подпись | | | | |  | | Фамилия ИО | | |
|  |  |  | | | | |  |  |  | « » |  |  | | | | | |  | 201 г. |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2018 г.

**Реферат**

Отчет 45 с., 3 ч., 31 рис., 1 табл., 8 источников, 2 прил.

ВАКУУМНАЯ КАМЕРА, АБРАЗИВНАЯ СРЕДА, ВЫСОКИЙ ВАКУУМ, СИСТЕМА ПОДАЧИ, СБОРКА СТЕНДА, РАСЧЕТ.

Объектом исследования является макетный стенд для исследования эмиссии электронов с пылевых макрочастиц под действием коротких лазерных импульсов.

Цель работы – разработать систему подачи пыли и стенд для эксперимента по исследованию эмиссии электронов с пылевых макрочастиц под действием коротких лазерных импульсов.

В результате исследования была спроектирована вакуумная камера, система подачи пыли, произведен расчет объема пыли, расчет надежности, расчет расхода пыли, расчет допустимой толщины стенки камеры.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели: высокий вакуум, работа с агрессивной абразивной средой.

Степень внедрения – лабораторный макетный стенд.

**Оглавление**

[Введение 4](#_Toc514276858)

[1 Теоретическая часть 6](#_Toc514276859)

[1.1 Описание принципа работы вакуумной камеры 6](#_Toc514276860)

[1.2 Анализ выбора системы выброса пылевых макрочастиц 11](#_Toc514276861)

[1.2.1 Устройство с нормально-закрытым клапаном 11](#_Toc514276862)

[1.2.2 Устройство с электромагнитом для открытия затвора 14](#_Toc514276863)

[1.2.3 Устройство с простым механизмом открытия затвора 17](#_Toc514276864)

[1.3 Выбор системы выброса пылевых макрочастиц 18](#_Toc514276865)

[2 Проектная часть 21](#_Toc514276866)

[2.1 Расчет объема пыли в контейнере 21](#_Toc514276867)

[2.2 Расчет надежности системы 22](#_Toc514276868)

[2.3 Расчет расхода пыли 25](#_Toc514276869)

[2.4 Расчет допустимой толщины стенки вакуумной камеры 29](#_Toc514276870)

[3 Конструкторская часть 31](#_Toc514276871)

[3.1 Особенности изготовления деталей методом 3D-печати 31](#_Toc514276872)

[3.2 Компоненты вакуумной камеры 34](#_Toc514276873)

[Заключение 44](#_Toc514276874)

[Список использованных источников 45](#_Toc514276875)

[Приложения](#_Toc514276876)

# **Введение**

В данной работе рассмотрен экспериментальный стенд, на котором моделируется облако пылевых частиц, а также зондирование электромагнитным излучением в радиочастотном и оптическом диапазонах. От того, присутствует ли межзвездная пыль в межзвездной и межпланетной среде, зависит характеристики излучения и качество сигнала. Также пылевые частицы способны ослабить излучение, изменить его спектральный состав и состояние поляризации [1].

Конструкция стенда учитывает тот факт, что, во-первых, эксперимент проводится в условиях гравитации, во-вторых, установка работает с агрессивной абразивной средой, поэтому в самой камере на момент начала эксперимента присутствует вакуум, что серьезно осложняет решение таких проблем, как хранение, подача пыли в камеру, проведение нескольких экспериментов кряду без необходимости откачивать воздух из камеры снова.

Суть данной работы заключается в описании и устройстве самого экспериментального стенда и системы подачи пыли. Само устройство будет рассматриваться как металлическое изделие с системой подачи пыли, у которой компонент ее хранения - контейнер изготовлен из полимерных материалов, а механизм активирования данной системы будет представлен выбранной системой подачи пыли, представленной как электромотор, выполняющий функцию вибрации и функцию вращения, набор подручных материалов, используемых в легкой и в целлюлозной промышленности – нить и клейкая лента.

Функция вибрации необходима для того, чтобы, во-первых, искусственно увеличить время эксперимента, во-вторых, приблизить поток падающей пыли к равномерному на протяжении всего времени высыпания, в-третьих, уменьшить вероятность слипания частиц пыли между собой.

Функция вращения является ключевой для работы всей системы, так как при ее отсутствии установка будет в нерабочем состоянии. Ротор наматывает нить, которая, в свою очередь, закреплена к закрывающей щель клейкой ленте. При ее отрыве от затвора пыль начинает высыпаться из контейнера.

 Целью данной работы является проектирование вакуумной камеры и системы подачи пыли, а также изучение принципа работы установки и технических особенностей в ее конструировании. Данная работа является актуальной, так как при положительных результатах эксперимента возможно дальнейшее применение пылевой плазмы в военно-оборонной промышленности и в космической деятельности.

# **Теоретическая часть**

## Описание принципа работы вакуумной камеры

Данная схема показывает в общих чертах, что из себя представляет оборудование для эксперимента:

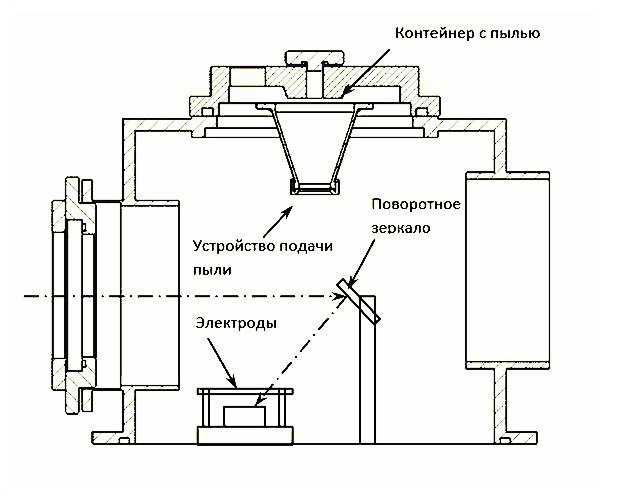


Рисунок 1.1.1 - Схема устройства экспериментального стенда

Задача контейнера состоит в хранении пыли, обеспечивании наиболее герметичного способа подачи пыли для подачи извне и отвода к устройству для подачи пыли в вакуумную камеру. К самому контейнеру прикрепляют вибрирующий элемент, ускоряющий скорость подачи пыли и уменьшающий влияние адгезии частиц пыли на поверхности.

Как можно увидеть, устройство для подачи пыли представляет из себя механизм, обеспечивающий передачу пыли из контейнера для ее хранения в вакуумную камеру, управление которым может осуществляться вручную или на расстоянии. К нему предъявляется особые требования, так как в случае его неполадки эксперимент будет являться несостоявшимся.

Проблема подачи пыли из контейнера в вакуумную камеру состоит в том, что в земных условиях практически невозможно обеспечить в контейнере вакуум, который присутствует в камере, из-за чего возникает резкий перепад давления. Наличие воздуха в контейнере означает, что скорость подачи пыли при открытии затвора увеличится, что может негативно повлиять на оценку результатов эксперимента. Применение насоса для контейнера в данном случае невозможно, так как при откачке произойдет выход оборудования из строя в связи с попаданием пыли в его рабочие части. Несмотря на то, что обеспечить абсолютное отсутствие воздействия воздуха физически невыполнимо, возможно обеспечить наименьшую разницу в давлении при использовании соответствующего устройства для подачи пыли. Из вышесказанного можно сделать вывод, что сам факт проведения эксперимента в земных условиях означает необходимость в использовании атмосферного шлюза.

Большого внимания заслуживает и адгезия частиц пыли, находящихся внутри контейнера. Слипание частиц может привести к неточным измерениям и к сложностям в работе устройства для подачи пыли вплоть до полного выхода из строя. Для данного эксперимента необходимо, что ее показатель был как можно меньшего значения.

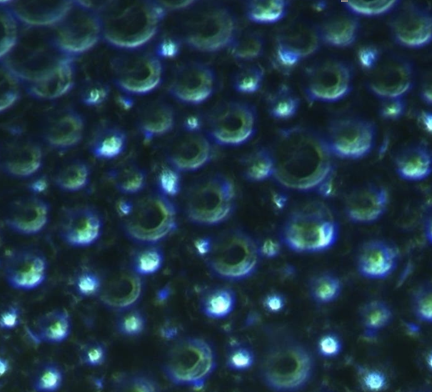


Рисунок 1.1.2 – Титановая пыль под микроскопом

Температура имеет особое влияние на эксперимент. Хотя ее влиянием на фотоэффект обычно пренебрегают, она имеет большое значение, как для достоверности эксперимента, так и для адгезии пыли.

Установка представляет собой набор компонентов, которые функционируют последовательно. До начала эксперимента в контейнер конусообразной формы засыпается пыль, щель заглушки на конце контейнера, который мешает пыли высыпаться под воздействием силы гравитации, заклеивается подручными материалами, имеющие клеящую сторону. В свою очередь, нитка с одного конца крепится к клеящей полосе, а другой ее конец наматывается на ротор электромотора. Его назначением является создание вибрационных колебаний, которые помогают повели высыпаться медленнее, что помогает увеличить суммарное время эксперимента. Дно очищается от остатков пыли из предыдущего эксперимента. Запускается насос, откачивающий воздух из камеры и контейнера. Подаётся напряжение на два электрода, который находятся внутри камеры, лазер приводится в действие. Подготовка к эксперименту завершена.

При проведении эксперимента замыкается цепь, в результате чего электромотор приводится в действие. Он наматывает на себя нить, одновременно с этим создавая вибрационные колебания. Нить отрывает клейкую полосу от щели, из-за чего начинает высыпаться пыль. По мере того, как пыль будет попадать под лазерное излучение, частицы пыли становятся ионизированными, после чего значения тока фиксируется электродами.

Ввиду ограниченной и узкой направленности экспериментального стенда следует отметить, что аналог данному устройству целиком может быть лишь представлен в том виде, если бы вся система целиком представляла собой покупное изделие. В качестве примера можно привести колпаковую вакуумную камеру MDC 524002 REF# SSBJ-24, которая, по сути, никак не отличается своим строением и функциональностью [7]. Отказ от использования любого аналога объясняется экономическим фактором и наличием возможности, времени и готовых деталей, из которых можно было сделать саму камеру.

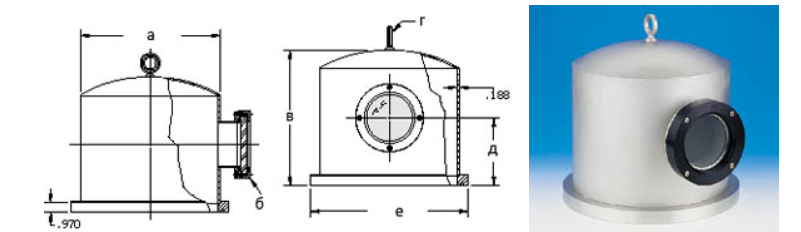


Рисунок 1.1.3 – Чертеж и модель вакуумной камеры MDC 524002

Для того, чтобы решить, как будет сделано устройство для подачи пыли, которое было бы способно поставлять абразивный материал в чистом виде без добавления воздуха и примесей внешней среды, несмотря на факт того, что вакуум воздействует на движущиеся части и рабочие поверхности устройства, будет рассмотрено несколько аналогов и причина, по которой они были бы внедрены с меньшим успехом.

В теории, являлось возможным использовать поворотный клапан, который применяется в сельском хозяйстве для сортировки зерна:



Рисунок 1.1.4 – Пневматический поворотный клапан

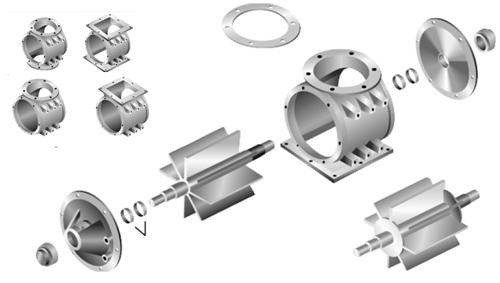


Рисунок 1.1.5 – Компоненты пневматического поворотного клапана

К сожалению, такой клапан будет использован с минимальной эффективностью, так как, во-первых, он имеет дополнительный поддув для движения абразива со стороны, что недопустимо для эксперимента, во-вторых, большое количество контактирующих поверхностей в вакууме будет приводить к тому, что устройство, скорее всего, не будет функционировать.

Существовал также вариант использовать простое устройство, принцип которого заключался в подаче абразива как через солонку, такой вариант тоже является труднореализуемым из-за большой площади контактирующих поверхностей в вакууме, что вызывало бы излишнее трение, результатом которого мог стать отказ механизма из-за мелкодисперсной пыли, попадавшей в двигающиеся части механизма.

Возможность использовать устройство, выполненного из контейнера с абразивом и продувочного пистолета, к сожалению, также нарушает достоверность эксперимента – продувательный пистолет работает под воздействием давления газа из баллона, а эксперимент предусматривает отсутствие давления извне.



Рисунок 1.1.6 – Продувочный пистолет с контейнером

## Анализ выбора системы выброса пылевых макрочастиц

При проведении анализа по поводу выбора система подачи пыли в данной работе будут рассмотрены три наиболее оптимальных варианта, которые могли бы найти свое применение в большей степени, чем все вышеперечисленные. Такими системами подачи пыли будут являться устройство с нормально закрытым клапаном, устройство с электромагнитом для открытия затвора и устройство с простым механизмом открытия затвора.

### **Устройство с нормально-закрытым клапаном**

Решение использовать электромагнитный клапан кажется самым высокотехнологичным из-за его очевидных преимуществ:

1. Способность управлять затвором без прямого контакта (с помощью реле)
2. Малая площадь соприкасающихся поверхностей
3. Возможно проведение нескольких экспериментов кряду

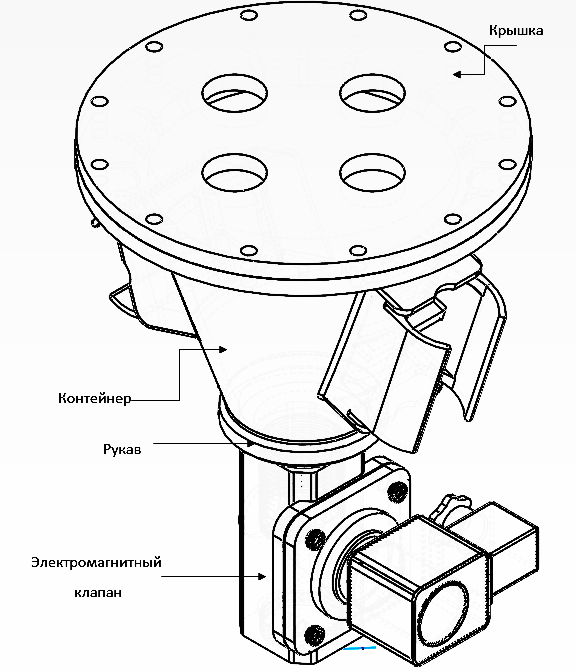


Рисунок 1.2.1.1 – Эскизное изображение устройства для подачи пыли

 Так как это устройство было разработано на основе уже имеющегося контейнера для хранения пыли, его компоненты подогнаны под контейнер и представляют из себя конструкцию из следующих элементов:

Крышка – верхняя часть устройства герметично крепится к контейнеру с помощью болтов с использованием герметика или спайки по линии контакта. Все четыре заклеенных пленкой крупных отверстия предназначены для того, чтобы в равных условиях провести серию из пяти экспериментов без необходимости разгерметизации камеры и контейнера. Это работает следующим образом: в предварительно заготовленные ампулы с острыми краями или другими режущими элементами засыпается пыль, после чего эти ампулы подаются в отверстия. Режущие элементы прорывают пленку, при этому пыль высыпается под воздействием сил гравитации и небольшой разницы давления.

Контейнер – пластиковая деталь, предназначенная для хранения пыли, поданной из ампулы. Для данного устройства будет использован уже существующий экземпляр. До начала проведения серии экспериментов в контейнер засыпается первая для подачи порция пыли.

Рукав – деталь, являющаяся переходником из контейнера к электромагнитному клапану. Имеет внешнюю резьбу подходящего диаметра, на которую будет посажен клапан.

Электромагнитный клапан – устройство, чей затвор управляется с помощью электричества. Заряд открывает или закрывает затвор, ограничивая подачу пыли, и позволяет создать вакуум в контейнере.

Цикл работы:

1. Клапан приводится в положение “Открыто”;
2. Создаются условия вакуума как в контейнере, так и в камере;
3. Клапан приводится в положение “Закрыто”;

Подготовка к эксперименту завершена. Порядок действий во время проведения эксперимента:

1. Пыль засыпается из ампулы, прорывая пленку, пыль попадает внутрь, ампула остается в отверстии до конца эксперимента;
2. Клапан приводится в положение “Открыто”;

Пыль попадает в камеру, опыт завершен. При необходимости проведения еще одного эксперимента:

1. Клапан приводится в положение “Закрыто”;
2. Повторить с п. 4 по п. 7.

Таким образом, эксперимент можно провести всего пять раз, после чего выключаются приборы, производится разгерметизация, ампулы вынимаются из отверстий, отверстия заклеиваются пленкой до следующего цикла работы.

Естественно, у такого устройства есть и недостаток – такое устройство обычно не используется для работы с абразивами, за исключением особо дорогих экземпляров (этим отчасти и объясняется низкая стоимость), но следует обратить внимание на то, что износ данного устройства будет в сотни раз меньше в данном эксперименте, чем в обычных условиях, поэтому таким недостатком можно пренебречь. Главной проблемой является то, что пыль будет высыпаться не полностью из-за устройства клапана, и, как следствие, объем высыпаемой пыли будет очень низок [5]. Конечно, это можно исправить с помощью модернизации, но тогда объем работ будет слишком огромен для решения такой задачи не первого приоритета. К тому же, в таком случае устройство не будет являться сертифицированным и будет трудно поддаваться замене.

### **Устройство с электромагнитом для открытия затвора**

Устройство с электромагнитом для открытия затвора представляет из себя набор компонентов, расположенных таким образом, чтобы обеспечить свободное движение пластиковой заслонки от щелевой насадки для контейнера вниз и обратно. Пластиковая заслонка представляет из себя пластину с наличием крепления для петель на одном конце и металлическим элементом в виде металлической пластины определенной толщины на другом конце. Пластиковая заслонка крепится с помощью петель к щелевой насадке, которая, в свою очередь, крепится к контейнеру защелкой. Электромагнит крепится на некотором расстоянии от места контакта металлического элемента и поверхности щелевой насадки таким образом, чтобы не притягивать излишнее количество металлической пыли к своей рабочей поверхности, что требует дополнительного расчета применение подъемной силы электромагнита.

Такая система подачи пыли работает следующим образом: до начала эксперимента электромагнит приводится в действие путем включения в сеть. Электромагнит начинает работать, тем самым притягивая к себе металлический элемент, расположенный на конце заслонки. После этого пыль засыпается в контейнер. Камера закрывается, происходит откачка воздуха из камеры. При проведении самого эксперимента при необходимости электромагнит отключается на непродолжительное время, тем самым заставляя заслонку падать вниз под воздействием силы тяжести, но при этом сама заслонка остается в висячем положении из-за должного расположение петель. Одновременно с этим пыль начинает высыпаться под силой тяжести и, формируя порцию подаваемой пыли в камеру объем, который может быть экспериментально подсчитан при помощи дополнительных расчётов. Стоит сразу отметить, что речь идёт о среднем значении высыпаемой в каждой порции пыли, а не о строго определенном объеме, из-за неоднородности ее распределения. После того, как необходимый объём пыли будет высыпан, электромагнит снова приводится в действие, тем самым притягивая металлический элемент к себе и, в свою очередь, закрывая затвор контейнера до следующей необходимости в высыпании пыли. Такая система подачи пыли позволяет проводить данный эксперимент неограниченное количество раз до того момента, как кончится пыль в контейнере.

|  |  |
| --- | --- |
| а) | б) |
| Рисунок 1.2.2.1 – Принцип работы устройства с электромагнитом для открытия затвора  а) Открытие затвора во время эксперимента; б) Закрытие затвора во время эксперимента | |

Конечно, использование электромагнита с малой индукцией, который, например, используется в бытовой технике, решило бы проблему выброса пыли, но на один раз, так как, к сожалению, электромагниты не рекомендуются к использованию в абразивной среде, а пыль липнет к корпусу и к притягивающему элементу. Электромагнит, в таком случае, просто бы притягивал к себе металлический элемент, закрепленный к пластиковой створке щели, которая бы откидывалась после начала эксперимента. Использование кустарной катушки с большим количеством витков способствовало бы путем побора подобрать необходимое количество витков и источник питания, но, как и любой прибор, обладающий магнитным полем, при его повторном включении для закрытия створки щели создавалось бы излишнее магнитное поле, которое могло бы повлиять на чистоту эксперимента.

Рассмотренный в данной работе электромагнит QGT-P25/20  является близким к хорошему, но не идеальному решению из-за его ограниченности в невозможности выбрать определенную подъемную силу, из-за чего придётся идти на различного рода ухищрения, связанных с расчетом расстояния электромагнита до металлического элемента, должным расположение электромагнита вплоть до частичной перестройки контейнера или добавления нужного переходника.



Рисунок 1.2.2.2 – Электромагнит QGT-P25/20

При работе с вакуумной техникой и такой агрессивной средой внутри необходимо учесть как и экономический фактор, так и подбор необходимых компонентов, которые были бы способны выполнять поставленные задачи. Следует полагаться на проверенные и надежные способы подачи пыли, которые не могли бы помешать ходу проведения эксперимента. В данном случае принятый способ является механическим, и его эффективность по отношению к его простоте предпочтительнее любого представленного ранее способа.

### **Устройство с простым механизмом открытия затвора**

Данное устройство выделяется на фоне конкурентов своей неприхотливостью к своей рабочей среде, его компоненты легко заменимы и могут быть изготовлены из подручных материалов, его изготовление самое дешевое из всех устройств, представленных выше, что является несомненным преимуществом относительно других устройств.

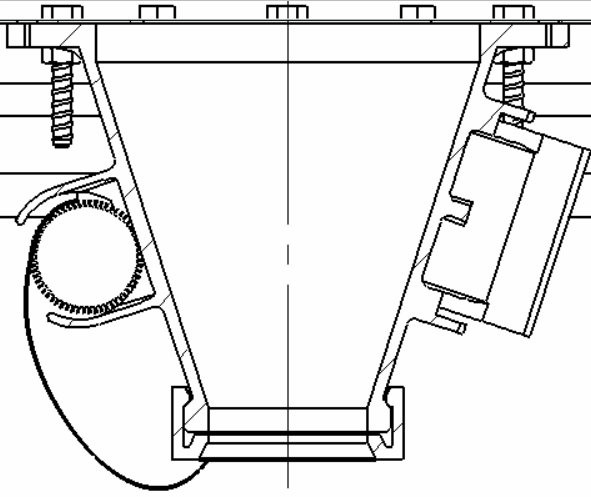


Рисунок 1.2.3.1 – Интегрированное устройство с простым механизмом открытия затвора

Устройство с простым механизмом открытия затвора представляет из себя набор из электромотора из радиоуправляемой модели, нити и полоски клейкой ленты.  Принцип работы данного устройства представляет собой кинематическую цепь.  До начала эксперимента щель в насадке для контейнера закрывается клейкой лентой, а сама насадка крепится к контейнеру при помощи защелки. Один конец нити крепятся к клейкой ленте и, а второй ее конец привязывается к ротору электромотора. В контейнер засыпается пыль, камера закрывается и подвергается откачке воздуха. При проведении эксперимента для активации данного устройства необходимо включить электромотора в сеть. Дело в том, что электромотор выполняет две функции одновременно, он выдаёт вибрационные колебания в сторону стенки контейнера и приводит в действие система подачи пыли. Нить начинает наматывается на ротор электромотора, притягивая тем самым к себе клейкую ленту. Щель отказывается открытой, что приводит к высыпанию пыли из контейнера. Данную процедуру можно провести лишь один раз до следующей откачки воздуха из камеры.

|  |  |
| --- | --- |
| а) | б) |
| Рисунок 1.2.3.2 – Принцип работы устройства с электромагнитом для открытия затвора  а) Положение устройства до начала эксперимента; б) Положение устройства во время эксперимента | |

## Выбор системы выброса пылевых макрочастиц

Чтобы сделать выбор в пользу лучшего устройства из всех вышеперечисленных, следует обратить внимание на следующие критерии.

Отсутствие электромагнитного поля является несомненным плюсом, так как наличие любого стороннего поля, не предусмотренного в эксперименте, негативно влияет на результаты эксперимента. Можно отметить, что таким параметром обладает лишь устройство с простым механизмом открытия затвора.

Высокая точность засыпаемой порции пыли является дополнительным преимуществом, но не основным критерием для выбора необходимого устройства. Данный критерий достигается за счёт как выбор точного устройства, так и при помощи дополнительных расчётов. Такой характеристикой владеют устройство с нормально-закрытым клапаном и устройство электромагнита для открытия затвора.

Отсутствие дополнительных расчётов будет являться следующим критерием, так как любая лишняя вычислительная работа делает больше срок для подготовки данного устройства к внедрению в установку. относится лишь к устройствам с простым механизмом открытия затвора.

Простота изготовления является важным критерием, так как любая сложность, связанная с эксплуатацией системы подачи пули может стать роковой. Более того, принятие данного критерия во внимание позволяет уменьшить количество человеко-часов для обслуживающего установку персонала. Подобно предыдущему критерию, такое можно сказать лишь про устройство с простым механизмом открытия затвор.

Такой немаловажный параметр, как открытие затвора больше одного раза, позволяет сэкономить много времени для подготовки новой серии эксперимента. Такой функцией обладает устройство с нормально-закрытым клапаном и устройство с электромагнитом для открытия затвора.

Отсутствие дополнительных компонентов крепежа для устройства позволяет избежать ненужной конструкционной работы и, что, в свою очередь, сделает установку гораздо легче. Это относится к устройству с электромагнитом для открытия затвора и к устройству с простым механизмом открытия затвора.

Последним критерием является фактор затрат на изготовление устройства. В условиях исчерпаемых финансовых ресурсов данное требование выполняет лишь устройство с простым механизмом открытия затвора.

Для наглядности все вышеперечисленные критерии и устройства будут приведены в таблице 1.3.1.

Таблица 1.3.1 — Сравнение систем подач пыли

| № п./п. |  | Устройство с нормально-закрытым клапаном | Устройство с электромагнитом для открытия затвора | Устройство с простым механизмом открытия затвора |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Нет э/м поля | - | - | + |
|  | Высокая точность | + | + | - |
|  | Не нужны доп. расчеты | - | - | + |
|  | Простое изготовление | - | - | + |
|  | Открытие затвора >1 раза | + | + | - |
|  | Выброс необходимого объема | + | + | - |
|  | Не нужны доп. компоненты крепежа | - | + | + |
|  | Малые затраты | - | - | + |

Как можно увидеть, наибольшему количеству требований удовлетворяет устройство с простым механизмом открытия затвора, оно же и будет рассмотрено далее в работе, интегрировано в вакуумную камеру и отображено на сборке.

# **Проектная часть**

## Расчет объема пыли в контейнере

В идеальном случае распределение падающей пыли должно быть равномерным, что, однако, не является реализуемым в условиях микрогравитации. Наиболее приближенные условия будут при наличии призменного вытянутого контейнера, который позволит улучшить качество полученных результатов, однако из-за габаритов камеры и ряда технических ограничений, включающих монтаж электрооптических элементов и вакуумной техники наиболее приемлемым вариантом будет использование контейнера в форме конуса. Приведем количественную оценку характеристик контейнера и частиц пыли (титан) в нем:

d = 0,02 - длина щели, м

h = 0,001 - ширина щели, м

r0 = 4540- плотность титана, кг/м3

Vконт = 195.683 \* 10-6 - объем контейнера, м3

d0 = 50 \* 10-6 - диаметр частицы, м

k = 0,785 - коэффициент заполнения объема

|  |  |
| --- | --- |
| V = k \* Vконт | (2.1.1) |

V = 153 \* 10-6 - объем частиц титана, м3

|  |  |
| --- | --- |
| m0 = | (2.1.2) |

m0 = 2,97 \* 10-10 - масса одной частицы, кг

|  |  |
| --- | --- |
| N = | (2.1.3) |

N = 2,339 \* 109 - число всех пылевых частиц.

## Расчет надежности системы

Расчет надежности всей системы обеспечивается за счет надежности одного электромотора, который единственный из представленных компонентов обладает двигающимися деталями. За основной параметр, который характеризует его работоспособность, следует принять количество оборотов в минуту. Со временем работы прибора данный параметр уменьшается до предельного значения, по достижении которого его можно считать вышедшим из строя. За отказ принимается достижение количество оборотов в минуту предельного значения (540).

Если обратиться к гистограмме отказов, то можно убедиться в том, что распределение идет согласно распределению Гаусса (нормальному закону).

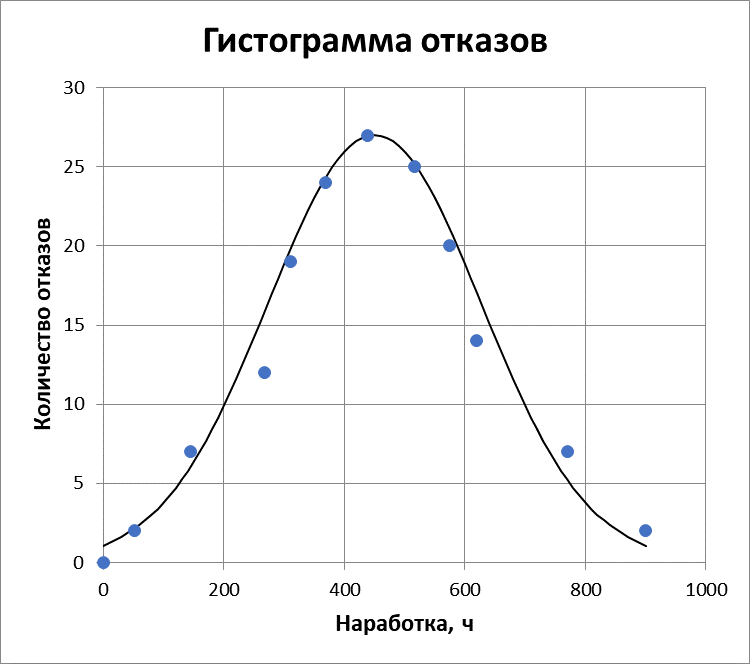


Рисунок 2.2.1 - Плотность вероятности распределения наработок до отказа

Нормальный закон распределения описывается через два параметра:  
1) Средняя наработка Тср, она же – математическое ожидание;  
2) Среднее квадратичное отклонение *σ*, которое для нормального распределения подчиняется правилу трех сигм:

|  |  |
| --- | --- |
| *σ=* | (2.2.1) |

где - максимальная наработка,



В нашем случае *σ*  будет равна 130.

В случае с работоспособностью электромотора функция плотности вероятности распределения наработок до отказа будет иметь следующий вид:

|  |  |
| --- | --- |
| *f(t) =* | (2.2.2) |

В общем случае, для вычисления вероятности безотказной работы (а следовательно – и вероятности отказа), требуется взять определенный интеграл следующего вида:

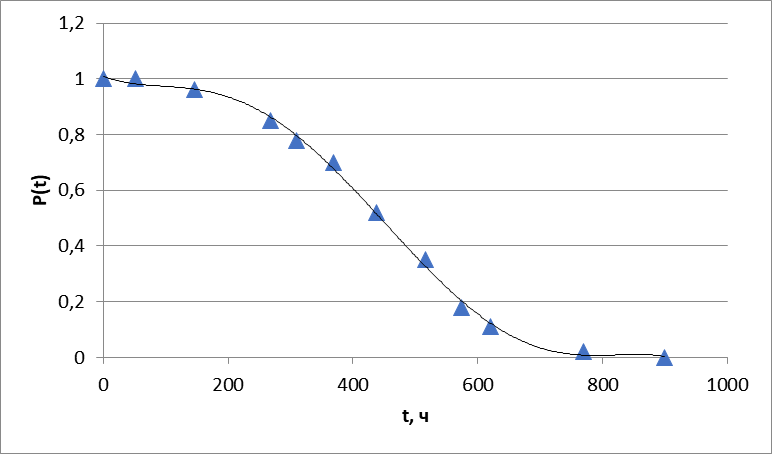
|  |  |
| --- | --- |
| *P(t) =* | (2.2.3) |

Также посчитать вероятность безотказной работы можно и по следующей формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| *P(t) = 0,5Фн()* | (2.2.4) |

где *Фн –* табулированная функция Лапласа.  
 Плюс в формуле ставится при положительных значениях аргумента у табулированной функции Лапласа, а минус при отрицательных.  
 График безотказной работы выглядит следующим образом:

Рисунок 2.2.2 - График безотказной работы P(t)

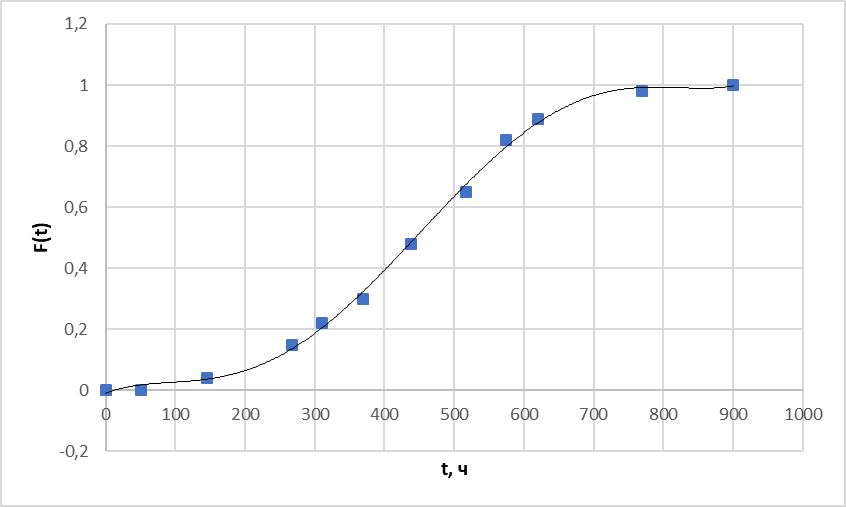


В свою очередь, вероятность отказа выводится из соотношения:

|  |  |
| --- | --- |
| *F(t) = 1 - P(t)* | (2.2.5) |

Таким образом, график вероятности отказа приведен на рисунке и выглядит следующим образом:

Рисунок 2.2.3 - График вероятности отказа F(t)



Таким образом, была проведена оценка вероятности безотказной работы электромотора. С течением времени рабочие параметры ухудшаются, из-за чего узел может привести к отказу всей системы.

## Расчет расхода пыли

В качестве расчета расхода пыли будет применено симуляции в программной среде Algodoo. Данная симуляция будет представлять собой контейнер с предварительно установленным затвором, который будет препятствовать высыпанию пыли до начала эксперимента. В виду того, что вычислительные способности современных компьютеров неспособны отобразить симуляцию падения такого большого количества частиц порядка 10 в 9 степени, придется пойти на некоторые условности: во-первых, сам контейнер будет выполнен в масштабе 1 к 100. Во-вторых, частицы пыли, представленные в данной симуляции, будут больше настоящих ввиду масштабирования, что, впрочем, не сильно повлияет на результат симуляции, так как это будет учитывать фактор адгезии, когда частицы пыли слипаются друг с другом. В-третьих, контейнер будет заполнен не полностью.

Для того, чтобы провести симуляцию данного эксперимента, необходимо нарисовать стенки контейнера. В связи с тем, что данная программа ограничена лишь двумя измерениями, придётся их нарисовать в разрезе и затем провести дополнительные подсчёты. Также необходимо нарисовать нижнюю стенку контейнера, то есть щелевую насадку с отверстием. В данном расчете будет применено отверстие радиусом 2 мм.

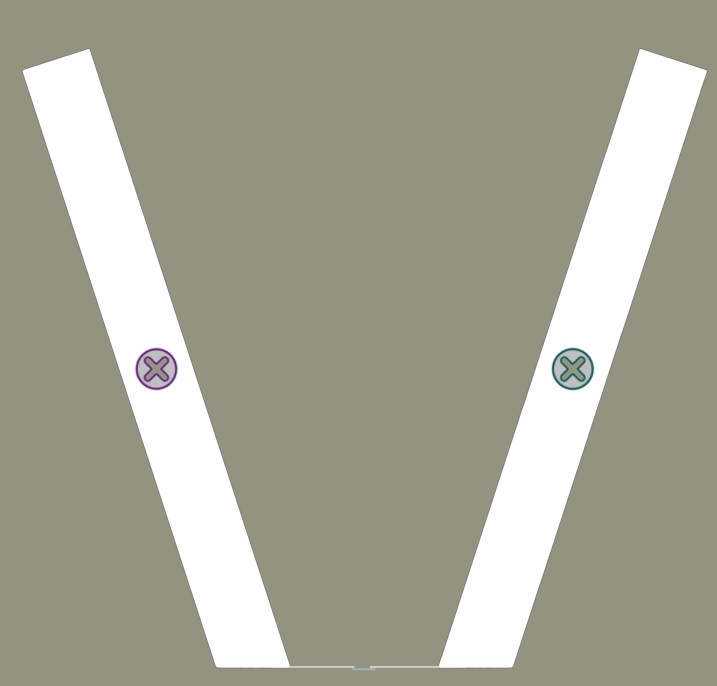


Рисунок 2.3.1 – Создание контейнера и щелевой насадки в разрезе

Следующим шагом будет создание первой частицы пыли. Ей будут присвоены такие параметры, как ее металлические свойства, плотность, равной плотности титана, и, естественно, ее диаметр. Это все может быть выбрано на основании данных из главы 2.1. Из условия применения масштабирования пылевой частицы получается, что в одной такой частице будет находиться около 46440 частиц на одну частицу симуляции.



Рисунок 2.3.2 – Создание пылевой частицы и ее параметризация

Следующим этапом для организации симуляции будет являться клонирование данной частицы пыли. К сожалению, контейнер не может быть заполнен полностью из-за слабых технических характеристик вычислительной техники, поэтому придётся ограничиться малым объёмом, то есть до того момента, когда симуляция может быть успешно выполнена. Для данного случая пыль будет засыпана на 8мм контейнера.

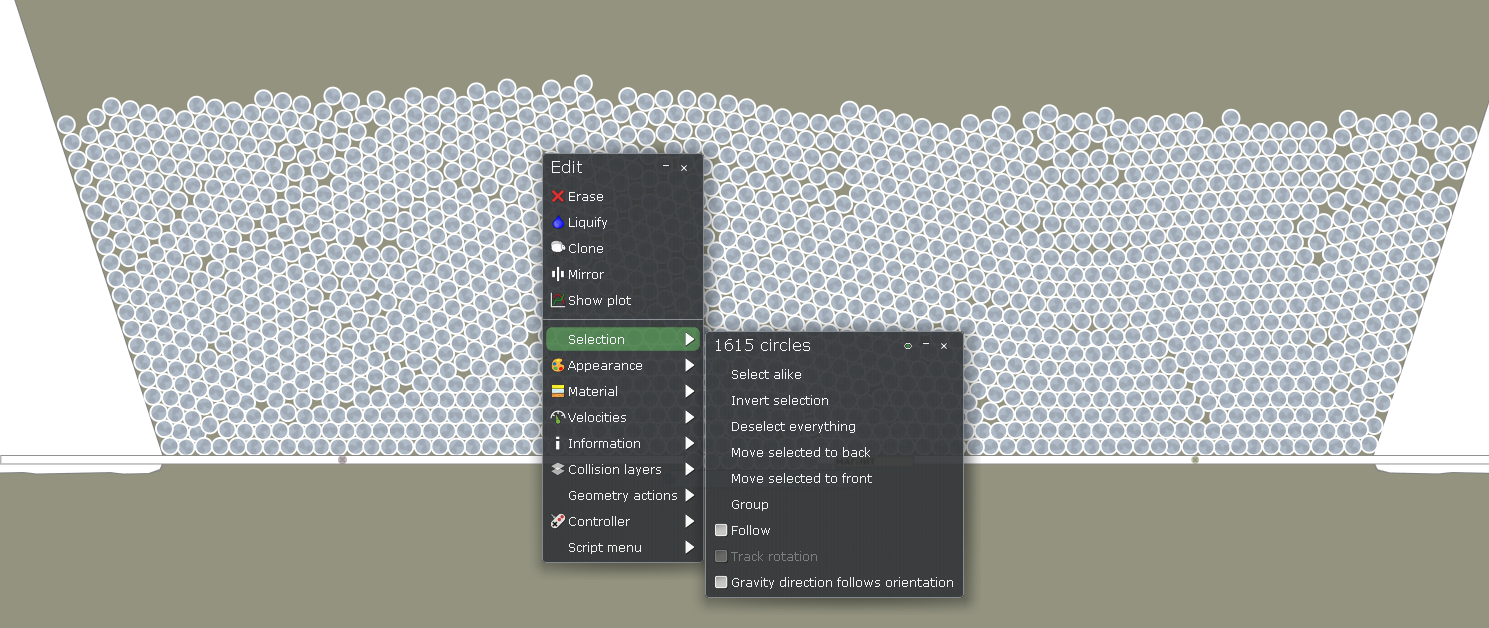


Рисунок 2.3.3 – Клонирование пылевой частицы и подсчет общего количества. Исходное состояние до начала эксперимента

В нашем случае не так важно, какой тип системы подачи пыли будет применён для данного контейнера, поэтому можно воспользоваться простым затвором в виде твердого тела, который будет висеть в воздухе с помощью якоря, который может быть устранен во время проведения эксперимента путем нажатия горячей клавиши.

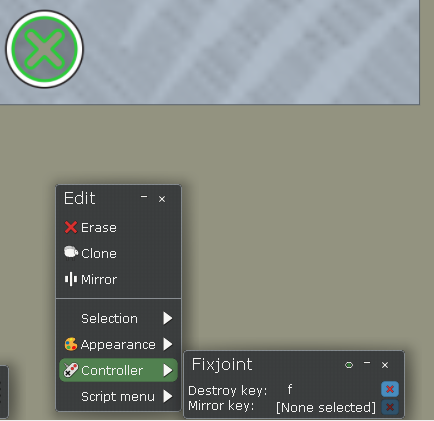


Рисунок 2.3.4 – Назначение горячей клавиши на открытие затвора

Необходимо учесть тот факт, что эксперимент проводится в условиях вакуума, поэтому придется выключить сопротивление воздуха.



Рисунок 2.3.5 – Деактивация сопротивления воздуха

Эксперимент не может быть проведён сразу при нажатии кнопки "Проиграть симуляцию" из-за того, что частицы пыли представляются в данном случае как набор твёрдых тел, из-за чего необходимо сначала дать данным телам образоваться целиком в контейнере. Такая аппаратная проблема решается простым ожиданием в течение нескольких секунд.

Когда всё будет готово к проведению эксперимента, оператор симуляции нажмет горячую клавишу, который приведет к уничтожению якоря, из-за чего пыль начнёт сыпаться. Подсчёт в данном случае будет происходить следующим образом: изначально будет известно количество частиц пыли, которая находится в контейнерах. По прошествии определенного времени симуляция будет остановлена, и будет зафиксировано количество частиц пыли, которые успели высыпаться из контейнера.

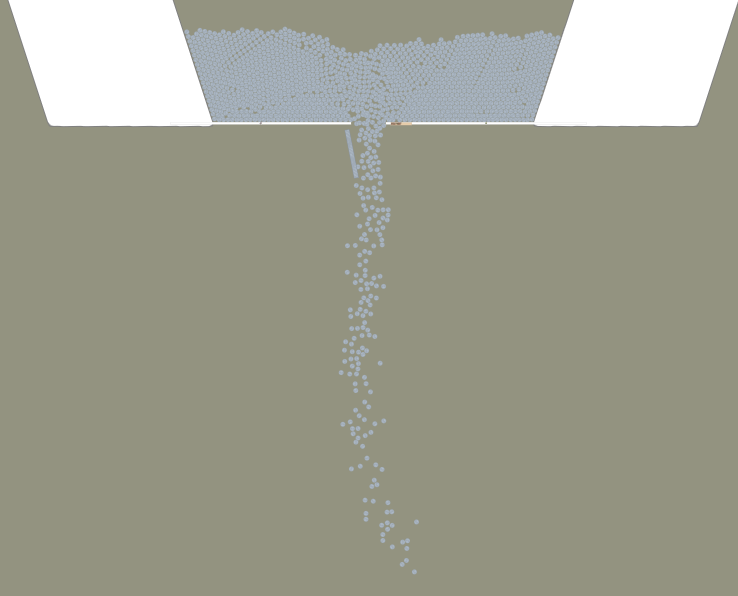


Рисунок 2.3.6 – Фиксация значений расхода пыли

Таких остановок будет двадцать четыре. Полученные данные будут занесены в таблицу и пересчитаны для подсчёта настоящего количество частиц пыли, а затем, используя данные из пункта 2.1, будет посчитан расход пыли в граммах на одну секунду.

Важным критерием для параметризации частиц пыли в симуляции является коэффициент трения. Так как его крайне сложно определить в реальном эксперименте ввиду большого количества факторов, относящиеся к физике столь малого твердого тела, будут проведены пять симуляций с коэффициентами трения 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 и 0,9 соответственно.

Графики с представленными кривыми, построенных при помощи результатов симуляции с разными коэффициентами трения частиц пыли, представлены в приложении А.

Как можно увидеть, графики зависимости для разных коэффициентов трения частиц пыли можно условно разбить на четыре участка: участок разгона, при котором начинается подача пыли, участок стабильного потока, участок переходной зона, при которой поток начинает ослабевать, и участок досыпания пыли, где медленно высыпаются оставшиеся частицы. Стоит отметить, что для практической составляющей нас интересует лишь тот участок стабильного потока пыли, который характеризуется коэффициентом линейной функции аппроксимации участка стабильного расхода пыли.

Стоит принять во внимание, что, во-первых, в реальной установке присутствует вибрирующий электромотор, замедляющий падение пыли, во-вторых, может присутствовать сетка, тем самым уменьшая площадь щели, в-третьих, как уже было сказано ранее, равномерное распределение частиц невозможно в условиях микрогравитации, поэтому такая оценка является субъективной и требует дополнительного пересчета для каждого индивидуального случая.

## Расчет допустимой толщины стенки вакуумной камеры

Вакуумные трубопроводы должны быть способными выдержать давление без разрушения или потери устойчивости [2].

Минимальную допустимую толщину стенок трубопровода из условия его прочности S/Dу < 0,05 определяют по формуле

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.4.1) |

где S – толщина стенки, м;

Pатм – атмосферное давление, Па;

Dу – диаметр трубопровода, м;

С – прибавка на коррозию и технологический допуск, м;

σдоп – допускаемое напряжение.

Допускаемое значение σдоп принимается равным наименьшему из трех значений: предел прочности, условный предел текучести и условный предел длительной прочности материала труб при их рабочей температуре. Для данного расчета такой величиной оказался условный предел текучести. Величина прибавки С колеблется в пределах (0,05…0,18) S. Для расчета будет взято максимальное значение добавки. Формулу (2.4.1) можно переписать следующим образом:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.4.2) |

Тогда минимальное допустимое значение толщины стенки можно подсчитать:



Таким образом, можно сказать, что стандартная для труб и вакуумных камер толщина стенки 7,2мм отвечает требованиям прочности, что обеспечит целостность камеры во время ее работы.

# **3 Конструкторская часть**

## Особенности изготовления деталей методом 3D-печати

3D-печать является перспективной отраслью для изготовления пластиковых деталей малого тиража. Учитывая тот факт, что в данной сборки присутствуют компоненты из пластика, выполненные при помощи 3D печати, стоит упомянуть о технологическом процессе изготовления. При изготовлении деталей могут возникнуть определенные сложности. Далее будут представлены наиболее распространенные проблемы, связанные с 3D-печатью деталей, их описание и их решение. Стоит заранее отметить, что будут приведены лишь такие дефекты, связанные с непосредственно конструированием детали, а не ее исполнением.

Такой дефект, как коробление, заключается в том, что из-за того, что пластик переходит из жидкого, затем в твердо-жидкое, а затем в твердое состояние при смене температур, пластик начинает уменьшаться в объеме [6]. Этот неравномерный процесс начинает свое воздействие с краев деталей, и только потом переходит к ее центральной части. В связи с этим возникает внутреннее напряжение, способные оторвать края или сломать деталь. С такой проблемой борется следующим путем: уменьшает заполняемость, тем самым остается меньше объем пластика для сжатия, и, соответственно, уменьшается усилие отрыва. Также можно использовать горячий стол, в связи с чем проигрываются нижние свои, что даёт равномерное распределение напряжений внутри детали. Создание внешнего контура вокруг и детали создаст что-то вроде термобарьера вокруг нее, из-за чего будет поддерживаться температура по объему, что приведет к равномерному распределению напряжений по детали. Альтернативным вариантом будет служить наличие закрытой камеры. Также можно использовать конструктивные элементы. Это возможно выполнить при наличии следующих условий: деталь должна иметь плоскую грань или дополнительные отверстия. Также разумным вариантом будет увеличение силы сцепления.



Рис. 3.1.1 – Коробление на детали

Вскип или подутость является таким дефектом, при котором выступы на верхнем слое детали могут быть как открытого, так и закрытого типа. Это связано с провисанием пластика, который не успевает охлаждаться при печати в воздухе без поддержек. Борьба с дефектом заключается в следующем: необходимо обеспечить охлаждение, в связи с чем пластик будет хорошо остывать на верхнем слое. Также разумным решением будет обеспечения достаточной толщины слоя и стенки. Изменение заполняемости также имеет положительный эффект в решении данной проблемы.



Рис. 3.1.2 – Вскип (подутость) на детали

“Слоновьей ногой” называют такой дефект, при котором нижний свои детали по площади больше, чем должны быть. Такой дефект ликвидируется при помощи конструкционных улучшений модели, такое может быть реализована при добавлении маленьких фасок или сопряжений.



Рис. 3.1.3 – “Слоновья нога” на детали

Рыхлота или провисание является таким дефектом, при котором пластик провисает вместо получения ровной горизонтальной поверхности. Единственной конструкционной рекомендацией по этому поводу может служить лишь оптимизация детали, заключающаяся в выборе нужной толщины слоя.



Рис. 3.1.4 – Рыхлота на детали

Царапины на поверхности могут являться следствием сложной геометрии детали. Такой дефект может решиться добавлением ровного слоя на модель или же упрощение геометрии детали в целом.



Рис. 3.1.5 – Царапины на детали

## Компоненты вакуумной камеры

Сборка представляет собой набор элементов, соединенных между собой или на резьбовые соединения, или с помощью защелки. На приведенных ниже изображениях будет показано, как выглядит модель камеры целиком и в разрезе, а также буду приведены названия компонентов для более удобного ознакомления с их описанием и назначением.

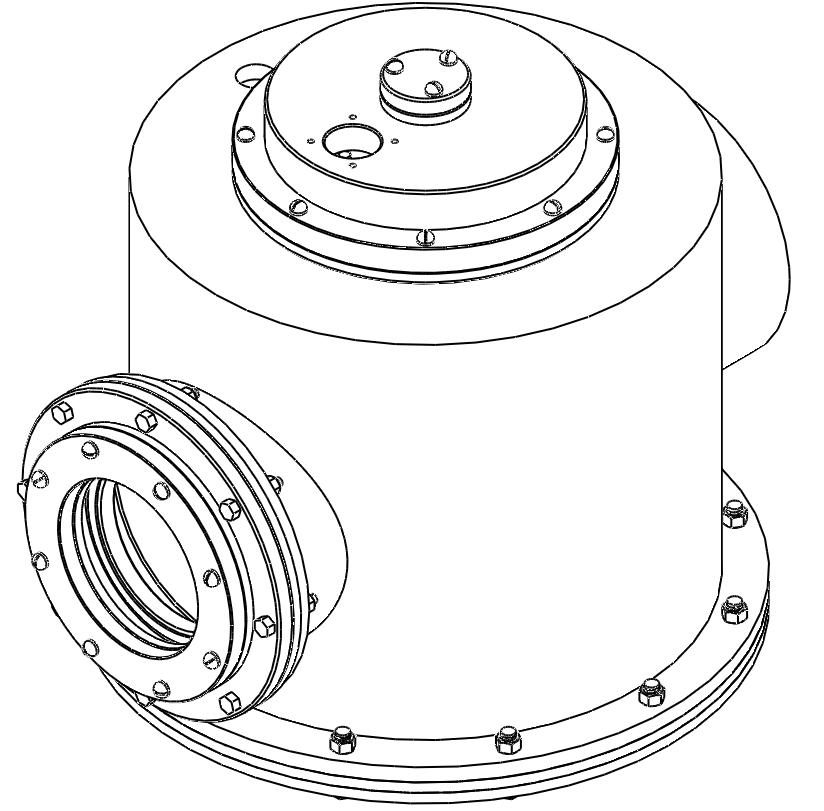


Рисунок 3.2.1 – Изображение модели сборки вакуумной камеры в программе Solidworks

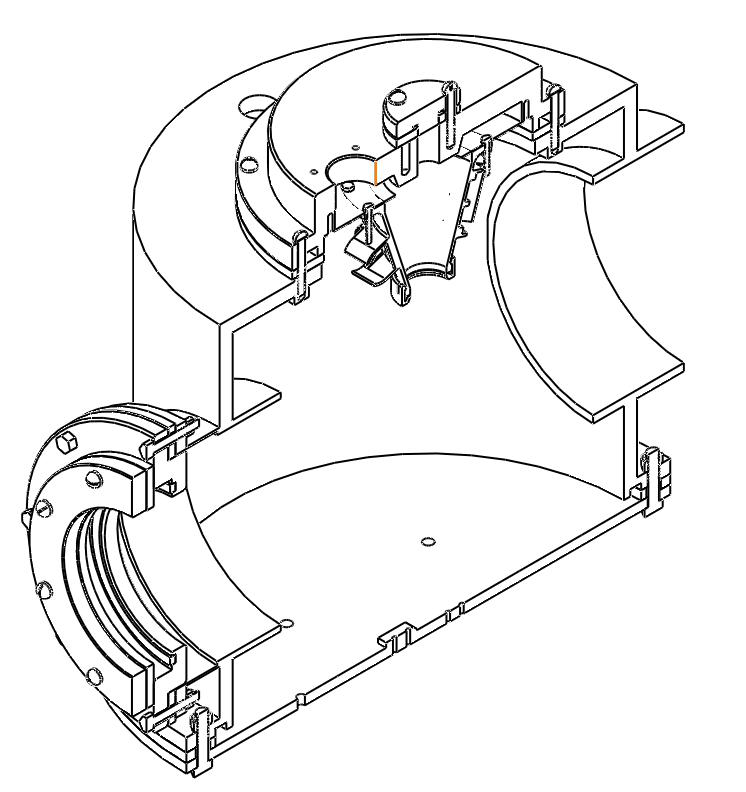


Рисунок 3.2.2 – Изображение модели сборки вакуумной камеры в половинчатом разрезе в программе Solidworks

Корпус представляет собой стальное изделие, имеющее полость внутри себя, два крупных отверстия, при этом одно из них имеет собственный фланец, другое предназначено для воздействия лазера, при этом отверстие закрыто экраном [8]. Более того, верхняя поверхность имеет ряд отверстий, из-за чего данную поверхность можно рассматривать как отдельный фланец. Данное изделие также имеет отверстия на фланце, расположенного у дна. Назначение вышеперечисленных фланцев следующее: верхний фланец необходим для резьбового соединения корпуса и крышки, назначение бокового фланца заключается в том, чтобы обеспечить крепление экрана или другого оптического элемента. Фланец у дна необходим для того, чтобы, во-первых, обеспечить необходимое оснащение компонентами, необходимыми для проведения эксперимента и фиксации его результатов, во-вторых, для обеспечения должной герметизации путем резьбового соединения с дном или поверхностью, обладающий низкой шероховатостью. Также корпус имеет семь герметических разъемов, которые предназначены для вывода электрических элементов и измерительных приборов, которые находятся внутри корпуса. Корпус обладает стенкой толщиной 7,2 мм, которая наряду с цилиндрической поверхностью не позволяет вакууму внутри выгнуть стенки или допустить разгерметизацию в любом ее виде. Данная деталь требует нанесения сварных швов и изготавливается непосредственно на производстве в необходимых для этого условиях.

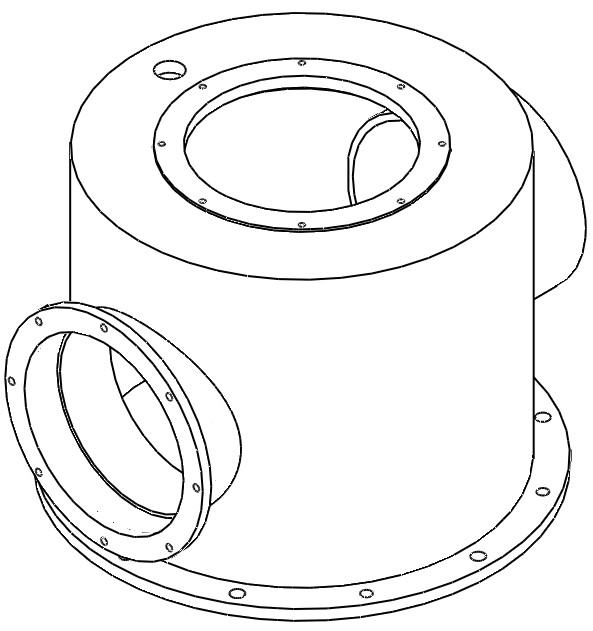


Рисунок 3.2.3 – Изображение модели корпуса в программе Solidworks

Крышка из себя представляет изделие из стали, которое предназначена для того, чтобы закрывать верхнюю часть корпуса, тем самым обеспечивая герметизацию камеры. Данное изделие обладает тремя герметическими разъемами для вывода электроники и измерительной техники внутри камеры наружу. Изделие изготавливается на станке ЧПУ, так как вручную его изготовление крайне затруднительно. Крышка имеет ряд сквозных отверстий на фланце, с помощью которых она крепится к корпусу путём резьбового соединения. Наружная сторона крышки обладает двумя крупными сквозными отверстиями. Их роль заключается в дополнительном подводе шлангов вакуумной техники, электрических измерительных приборов, оптических приборов, дополнительных механических приспособлений. Для данного стенда эти отверстия не были использованы, но их резервирование для будущего усовершенствования имеет потенциал для дальнейшей работы. Также на наружной стороне крышки имеются резьбовые глухие отверстия, которые предназначены для крепления пробки к крышке. Нижняя часть крышки обладает рядом глухих резьбовых отверстий, которые предназначены для крепления мембраны, что позволяет внедрить систему подачи пыли внутри вакуумной камеры, тем самым избежав возможные разрушения элементов, изготовленных из полимерных материалов. Стоит отметить, что при условии подачи пыли извне следовал бы большой перепад давления, в результате чего хрупкий соединения могли быть деформированные вплоть до полного отказа системы, элементы затворного механизма могли работать неисправно ввиду того, что запорный механизм не смог бы преодолевать такое большое давление. Конечно, эту проблему можно было решить путем подбора надежных и крепких материалов, просчитанной системе использования шлюзов, которая бы не позволяла подвергаться разрушению отдельным компонентам системы, но это вызвало бы ряд трудностей. Поскольку система с закрытой системой подачи пыли является на данный момент рабочей, то факт использования ненужных механических цепей и излишнего количества узлов наряду с проведением дополнительных производственных работ, излишней экономической нагрузки на бюджет проекта, решением дополнительных проблем определял бы экспериментальный стенд как установку, которая была спроектирована нерационально, и нарушал бы основные принципы конструкторской деятельности.

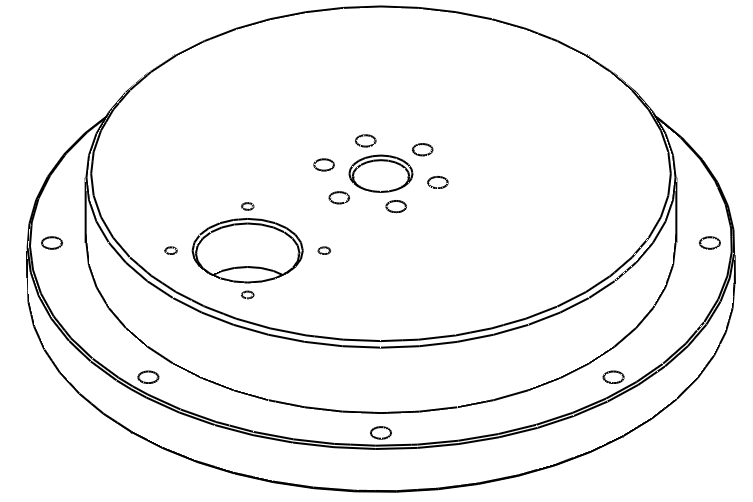


Рисунок 3.2.4 – Изображение модели крышки в программе Solidworks

Оправа является необходимым элементом для данной сборки, так как она служит деталью для установки экрана или иного пластикового элемента и препятствует разгерметизации камеры. Оправа обладает рядом сквозных отверстий, с помощью которых она крепится к корпусу. Оправа обладает на обратной стороне искусственно сделанное проточкой прямоугольного сечения, которая позволяет закрепить необходимые оптические элементы. В отличие от крышки, эта деталь может быть выполнена на токарном станке.

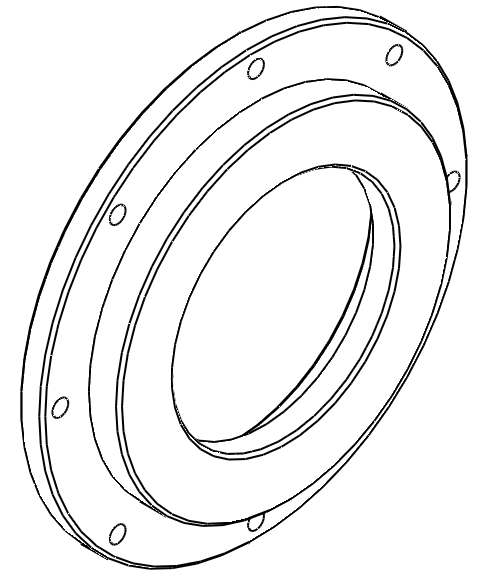


Рисунок 3.2.5 – Изображение модели оправы в программе Solidworks

Кольцо является элементом, который крепится непосредственно к оправе через сквозные отверстия, которые располагаются в нём. Более того, данная деталь притягивает резиновую прокладку к экрану, плотно фиксируя соединение. Данная деталь может быть изготовлена на обычном токарном станке.

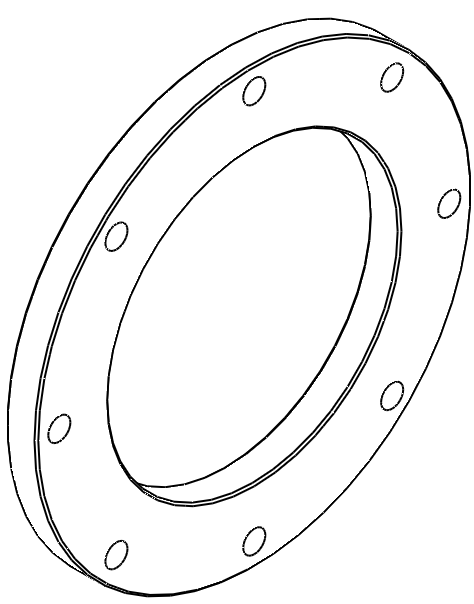


Рисунок 3.2.6 – Изображение модели кольца в программе Solidworks

Пробка является металлическим изделием, который имеет три сквозных отверстия, про точку без скруглений вокруг ее выпирающей части, которые, в свою очередь, служит для закупоривания сквозного отверстия в крышке. Данная деталь может быть выкинута из сборки при условии, что появится необходимость в использовании отверстия, которая закрывает эта пробка. Данная деталь может быть изготовлена на токарном станке.

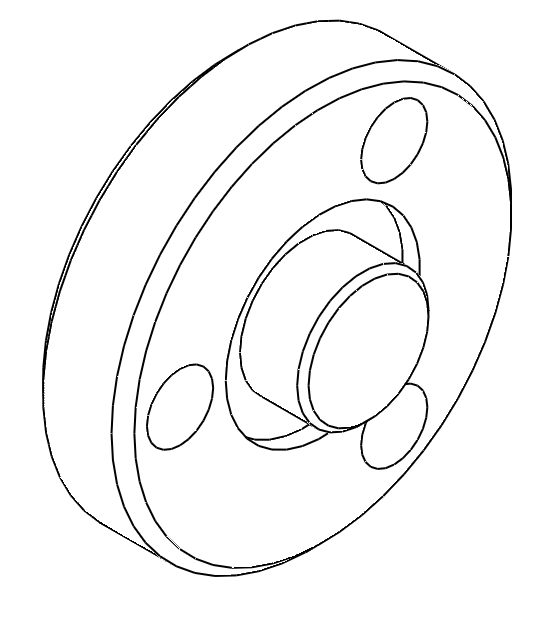


Рисунок 3.2.7 – Изображение модели пробки в программе Solidworks

Мембрана является изделием, изготовленной из тонкой металлической пластины толщиной 0,5 мм. Ее целью является обеспечить крепление контейнера к верхней части корпуса, при этом оставляя место для откачки воздуха при этапе образования вакуума в камере. Внешний ряд сквозных отверстий предназначен для крепления мембраны к верхней части корпуса, средний ряд отверстий предназначен для откачки воздуха, а внутренний необходим для крепления контейнера к мембране. Тонкая толщина пластины указывает на то, что, во-первых, данные толщина отвечает требованиям для подбора популярных вариантов метизов по длине резьбы, во-вторых, делает саму деталь легче, в-третьих, не так сильно влияет на процессы вибрации, который замедляет процесс падения пыли из контейнера. Данная деталь может быть изготовлена на токарном станке.

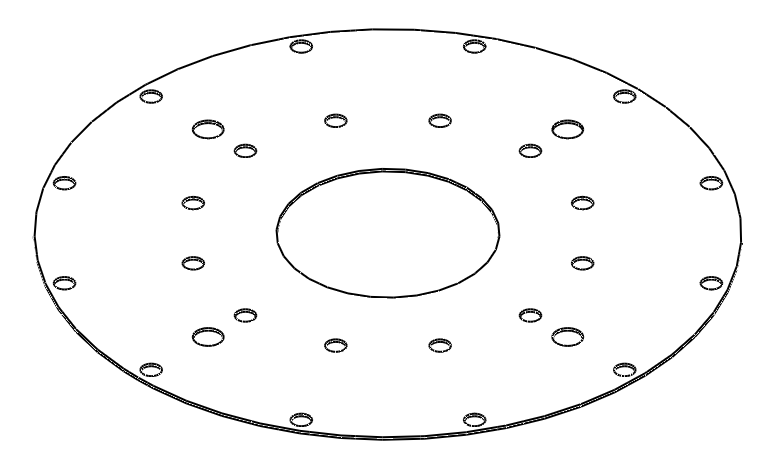


Рисунок 3.2.8 – Изображение модели мембраны в программе Solidworks

Контейнер является изделием, изготовленном из полимерных материалов, цель которого заключается в хранении пыли до ее подачи в вакуумную камеру. Данная деталь обладает фланцем, закрепленном дополнительными ребрами жесткости, который крепится к мембране с помощью резьбового соединения. Данный контейнер обладает стенкой минимальной толщины три мм, что является достаточным для выполнения поставленной задачи. Сам контейнер обладает конической формой, а на конической поверхности располагается два одинаковых, но расположенных перпендикулярно друг другу крепления. Любой из них может служить для крепления электромотора, проводов или других необходимых элементов. Сама деталь устроена так, что пыль проходит сквозной путь сверху вниз без всякой помехи. Вопреки сомнениям, данный контейнер показал себя как надежная деталь, который подвержен в минимальной мере нагрузкам температуры и давления.

Изделие изготовлено из полимерных материалов для того, чтобы обеспечить чистоту эксперимента. Во-первых, выбор в пользу данного материала аргументируется его диэлектрическими свойствами, что не позволяет воздействовать магнитному полю на частицы пыли до начала эксперимента, более того, частицы пыли имеют меньше шансов слипнуться и тем самым нарушить условия моделирования эксперимента. Во-вторых, данный материал из наиболее популярных имеет малую адгезию, из-за чего пыль высыпается приблизительно по одному и тому же закону. Поскольку пыль падает сверху вниз под воздействием силы гравитации, то ее часть падает вдоль конической сужающейся внутрь поверхности, что вызывает трение частиц с поверхностью контейнера.  в том случае, если бы контейнер был металлическим, то трение частиц с поверхностью было бы больше, и, соответственно, адгезия становилась больше. В-третьих, данная деталь может быть изготовлена на 3D принтере в домашних условиях и не требует больших затрат. В случае, если бы данная деталь изготавливалась из металла, то пришлось бы прибегнуть к лазерной резке, литью, гибки металлических пластин, что вылилось бы в большие экономические затраты и сроки ожидания.

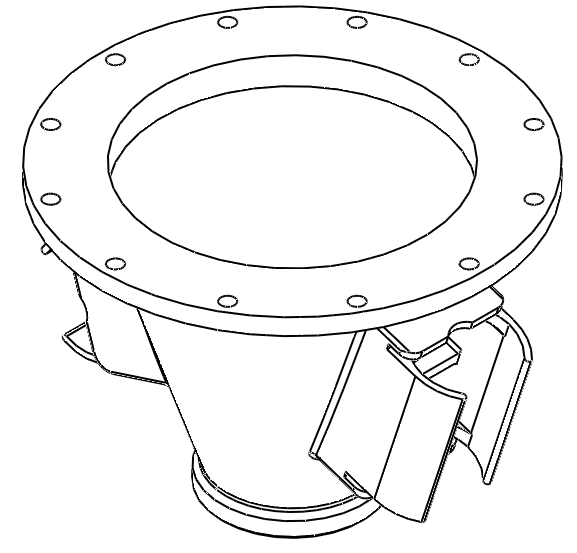


Рисунок 3.2.9 – Изображение модели контейнера в программе Solidworks

Защелка является изделием, изготовленным из полимерных материалов тем же вышеперечисленным причинам, что и контейнер. Ее задача заключается в прижатии пластины с щелью определенного размера, которая, в свою очередь, заклеивается клейкой лентой, к выходному отверстию контейнера, в результате чего пыль не будет падать из контейнера до начала эксперимента. Система крепления является типичным вариантом защелки, где с помощью силы и заведомо меньшего диаметра детали крепится к контейнеру за ее ребро с помощью ее выступающих частей. Данная деталь может быть изготовлена с помощью 3D-печати.

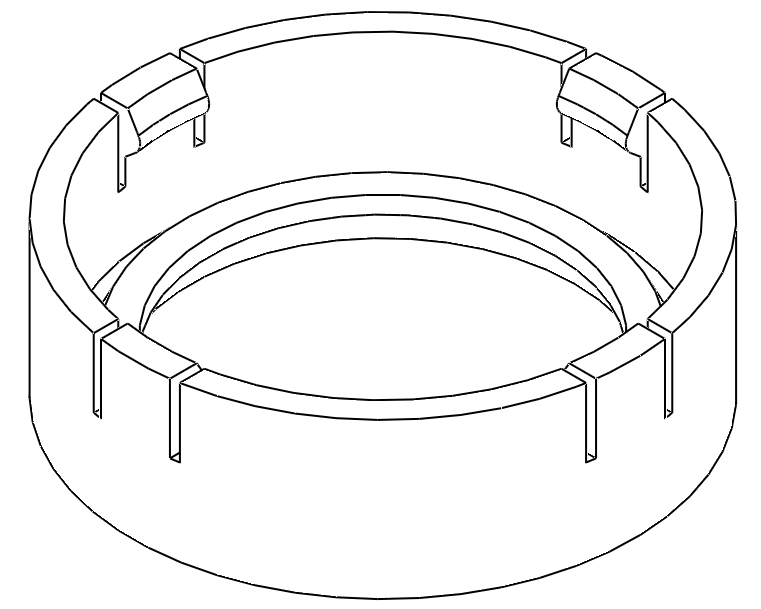


Рисунок 3.2.10 – Изображение модели защелки в программе Solidworks

Дно является изделием из стали, представляющее собой диск с отверстиями для крепления к корпусу и для крепления стоек МКП. Данный компонент является необходимым для удержания вакуума в камере.

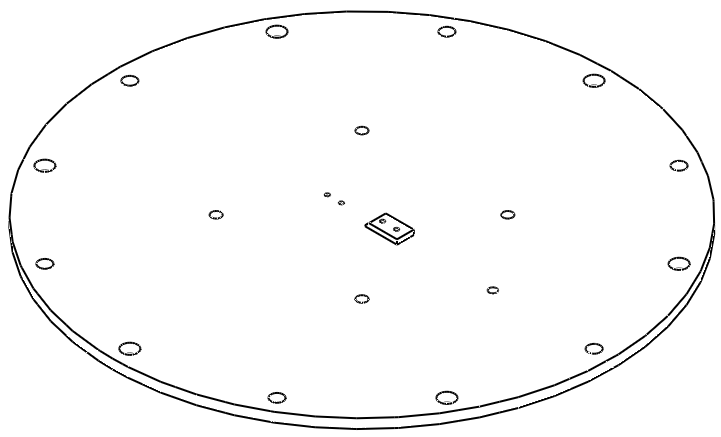


Рисунок 3.2.11 – Изображение модели дна в программе Solidworks

Помимо резьбовых соединений, для герметизации стыков используются прокладки толщиной 4мм. Кроме того, используется резиновая прокладка толщиной 2мм для того, чтобы не повредить экран или линзу, которая используется в экспериментальном стенде в качестве оптического элемента, воздействующего на луч. Вторичной ее функцией является визуализация эксперимента через ее поверхность.

Схема деления, сборочные чертежи, чертежи деталей и спецификации приведены в приложении Б.

# **Заключение**

Разработанный данный экспериментальный стенд имеет большой потенциал для проведения дальнейших экспериментов, связанных с изучением пылевой плазмы. У данного проекта имеется резерв для обеспечения таких дополнительных функций, как подача пыли с помощью шлюза, что позволит проводить несколько экспериментов подряд без ожидания откачивания воздуха после каждого раза, имеется дальнейшая возможность увеличить и дозировать объем поступающей пыли при помощи специальных клапанов, разработанных специально для работы с абразивами, что, в свою очередь, увеличит равномерность потока падающей пыли. Такие функции возможны при дополнительном вливании человеческого и экономического ресурса в данное исследование.

В данной работе дано теоретическое представление о принципе работы экспериментального стенда. Была приведена аргументация в пользу тех или иных компонентов, материалов и способов их изготовления, были описаны самые важные проблемы, которые могли возникнуть с образованием вакуума в камере. Были проведены расчет объема титановой пыли в контейнере, расчет надежности установки, расчет приблизительного расхода и расчет допустимой толщины стенки вакуумной камеры.

Стоит отметить, что данная установка не предназначена для работы в космическом пространстве, установка для таких задач будет иметь гораздо более сложное строение, а количество расчетов станет больше. С другой стороны, самая большая проблема с обеспечением подачи пыли несколько раз подряд будет сведена на нет из-за особенностей пространства, где будет проходить оригинальный космический эксперимент.

Таким образом, в данной работе описана рабочая модель экспериментального стенда для исследования пылевых частиц короткими лазерными импульсами.

# **Список использованных источников**

1. Ваулин О. С., Фортов В. Е., Петров О. Ф. Пылевая плазма: эксперимент и теория. М.: Физматлит, 2009.
2. Гайдуков В.Ф., Колесник В.П., Литовченко Л.В., Колесник В.В., Слюсарь Д.В. Проектирование и расчет вакуумных систем испытательных стендов и технологических установок. Курс лекций. К: Миллениум, 2009.
3. ГОСТ 2.701-2008 Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению.
4. ГОСТ ЕСКД. Единая система конструкторской документации. Основные требования к чертежам.
5. [ГОСТ Р 53671-2009](http://docs.cntd.ru/document/1200080745) Арматура трубопроводная. Затворы и клапаны обратные. Общие технические условия.
6. Дефекты 3D печати - Попробуем ввести классификацию / 3D Today – портал о 3D – печати. [М., 2018]. URL: <http://3dtoday.ru/blogs/leoluch/defects-3d-printing-will-try-to-introduce-a-classification/> (дата обращения: 06.05.2018)
7. Колпаковые камеры из нержавеющей стали / MSH Techno – Современное высокотехнологичное оборудование. [М., 2018]. URL: <http://www.msht.ru/catalog/1262/> (дата обращения: 08.04.2018)
8. Сталь 20 (ст20) - характеристики, состав, применение / Портал о черном металле и металлообработке. [М., 2018]. URL: <https://www.chermet.com/articles/all/stal-20/> (дата обращения: 10.04.2018)