

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

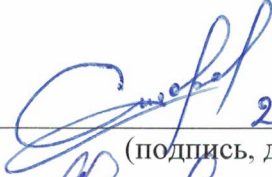
Факультет инженерно-физический  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы  
Направление подготовки 24.05.01 – Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов  
Специализация – Пилотируемые и автоматические космические аппараты и системы

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Зам. зав. кафедрой  
В.В.Соловьев  
«14» февраля 2022 г.

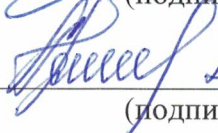
**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

на тему: Проектная разработка крупногабаритной вакуумной установки для проведения проверок лунных долговременных обитаемых комплексов на воздействие внешней среды


Исполнитель  
Студент группы 612-ос

  
28.01.2022. И.А. Сидоров  
(подпись, дата)


Руководитель

  
18.01.2022. А.В. Козырь  
(подпись, дата)

Консультант

  
28.01.2022 К.А. Насуленко  
(подпись, дата)

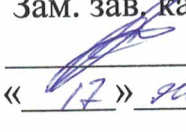
Нормоконтроль

  
28.01.2022 М.А. Аревков  
(подпись, дата)

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  
 В.В.Соловьев  
« 17 » января 2022 г.

**ЗАДАНИЕ**

К выпускной квалификационной работе студента Сидорова Ильи Андреевича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Проектная разработка крупногабаритной вакуумной установки для проведения проверок лунных долговременных обитаемых комплексов на воздействие внешней среды.

(утверждена приказом от 30.12.2021 №3047-уч)

2. Срок сдачи студентом законченного проекта:

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: Вакуумная камера вертикального типа с возможностью фронтальной загрузки для проведения температурно-вакуумных и тепловакуумных испытаний крупногабаритных объектов  $L \leq 10$  м,  $d \leq 3,5$  м с имитацией солнечной активности; предельное остаточное давление в камере  $P_{ост} \leq 10^{-8}$  Па; время форвакуумной откачки до  $P_{исп} \leq 10^{-1}$  Па до 15 часов; время откачки до  $P_{исп} \leq 10^{-6}$  Па до 36 часов.

4. Содержание выпускной квалификационной работы: общие сведения, проектный расчет вакуумной системы, описание вакуумной установки, вакуумные испытания, технологическая часть, безопасность жизнедеятельности, организационно-экономическая часть.

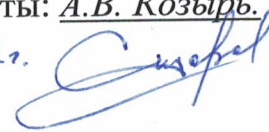
5. Перечень материалов приложения: общий вид, общий вид с размерами, схема членения, компоновка вакуумной системы в помещении, схема вакуумной системы, схемы систем откачки, графики основных характеристик вакуумных насосов, алгоритм испытаний.

6. Консультант по выпускной квалификационной работе: К.А. Насуленко.

7. Дата выдачи задания:

Руководитель выпускной квалификационной работы: А.В. Козырь.

Задание принял к исполнению (дата): 17.01.2022.



## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 90 страниц, 27 рисунков, 5 таблиц, 14 источников.

ВАКУУМ, ВАКУУМНАЯ КАМЕРА, ЗОЛОТНИКОВЫЙ НАСОС, АЗОТНАЯ ЛОВУШКА, ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ НАСОС, КРИОГЕННЫЙ НАСОС, КРИОПАНЕЛЬ, ТЕЧЕЙСКАТЕЛЬ

Цель работы – проектная разработка крупногабаритной вакуумной камеры вертикального типа с возможностью фронтальной загрузки для проведения температурно-вакуумных и тепло-вакуумных испытаний крупногабаритных объектов с имитацией солнечной активности.

Задачи:

- 1) Провести проектный расчет вакуумной системы;
- 2) Описать установку;
- 3) Описать технологическую часть;
- 4) Составить описание видов вакуумных испытаний;
- 5) Составить описание мер безопасности при проведении работ с вакуумной установкой;
- 6) Провести экономический расчет и обосновать разработку и использование вакуумной установки.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....	8
1.1 Понятие вакуума .....	8
1.2 Элементы вакуумной системы .....	9
1.3 Вакуумная камера .....	11
1.4 Обечайки.....	12
1.5 Оборудование для терморегулирования .....	13
1.6 Насосы .....	14
1.7 Вакуумные ловушки .....	16
1.8 Течеискатели .....	16
1.9 Запорно-регулирующая вакуумная арматура .....	17
2 ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ .....	18
2.1 Расчет газовых нагрузок .....	18
2.2 Выбор вакуумной схемы.....	22
2.3 Выбор вакуумных насосов.....	23
2.3.1 Выбор сверхвысоковакуумного насоса.....	23
2.3.2 Выбор высоковакуумного насоса .....	26
2.3.3 Выбор средневакуумного насоса.....	27
2.4 Определение конструктивных размеров трубопроводов и выбор элементов вакуумной системы. ....	30
2.4.1 Сверхвысоковакуумная система.....	30
2.4.2 Высоковакуумная система.....	34
2.4.3 Средневакуумная система .....	38

3 ОПИСАНИЕ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ.....	43
3.1 Общая структура установки .....	43
3.2 Вакуумная камера .....	43
3.3 Системы откачки .....	46
3.3.1 Золотниковый насос .....	46
3.3.2 Турбомолекулярный насос .....	48
3.3.3 Криогенный насос .....	50
3.4 Вакуумная азотная ловушка .....	52
3.5 Вакуумные трубопроводы .....	54
3.5 Запорно-регулирующая вакуумная арматура .....	55
3.6 Вакуумметры .....	57
3.7 Система разгерметизации .....	58
3.8 Система зарядки сжатыми газами .....	59
3.9 Гелиевый течеискатель .....	59
3.10 Система рециркуляции азота .....	60
4 ВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ.....	62
4.1 Тепловакуумные испытания .....	62
4.2 Вакуумно-температурные испытания .....	63
5 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....	64
6 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	69
6.1 Общие сведения о безопасности работы с вакуумной установкой .....	69
6.1.1 Безопасность труда.....	69
6.1.2 Основные правила безопасности при работе с гелиевым масс-спектрометрическим течеискателем .....	71
6.2 Правила безопасности при проведении работ со сжатыми газами .....	72

6.3 Правила безопасности при проведении работ с жидким азотом .....	73
6.4 Правила безопасности при проведении работ с вакуумными насосами ....	74
6.5 Правила безопасности при проведении работ на высоте с грузоподъемными механизмами .....	77
6.5.1 Правила безопасности при проведении работ с подъемным краном ...	78
6.5.2 Правила безопасности при проведении работ на подъемнике .....	78
6.6 Правила безопасности при проведении работ с электрооборудованием ...	78
6.7 Правила пожарной безопасности .....	80
7 ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	87
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	89

## ВВЕДЕНИЕ

Вакуум является основным физическим фактором пространства космоса и пространства на поверхности луны.

Когда газ или пар находится в разряженном состоянии при давлении ниже атмосферного, он обозначается как вакуум. Абсолютное давление является количественной характеристикой вакуума. Давление, при котором начинается вакуум это давление ниже  $10^5$  Па, то есть ниже атмосферного. Космический вакуум в слоях атмосферы Земли, других планет и некоторых спутников различается по физическим характеристикам.

Для того, чтобы проверить характеристики различных материалов и систем в условиях вакуума, используют вакуумные камеры. Они способны создавать имитацию космических излучений, температур и т.д.

## 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### 1.1 Понятие вакуума

Молекулы газообразного состояния находятся на значительных расстояниях друг от друга. Сила молекулярного взаимодействия молекул чрезвычайно мала. Молекулы большую часть времени движутся свободно, но иногда они соударяются друг с другом со стенками сосуда, в котором находятся. За счет соударения молекулы газа оказывают давление на стенки откачиваемого сосуда и на чувствительные элементы измерительных приборов.

Равнодействующее давление определяет собой степень вакуума в откачиваемых сосудах.

Равнодействующее давление можно получить через откачку газа различными насосами. Поступление газа в рабочий объем через различные неплотности и газовыделения с поверхностей объектов, которые находятся внутри сосуда, также влияют на давление.

Классифицировать вакуум можно по давлению. Таким образом, если средняя длина свободного пути молекул газа, во время которого они передвигаются беспрепятственно, гораздо меньше размеров сосуда, в котором производятся испытания, то данный вакуум является низким. Область давлений для такого вакуума составляет от  $10^5$  Па до  $10^2$  Па.

В случае, когда средняя длина свободного пути молекул газа достаточно близка к линейным размерам сосуда, в котором производятся испытания, данный вакуум является средним. Обычно этому типу вакуума присваивают значения давлений в диапазоне от  $10^2$  до  $0,1 \cdot 10^0$  Па.

Если средняя длина свободного пути молекул газа гораздо больше размеров сосуда, в котором производятся испытания, то данный вакуум характеризуется как высокий. Область давлений высокого вакуума составляет от  $0,1$  Па до  $10^{-5}$  Па.

При давлении в сосуде  $< 10^{-5}$  Па вакуум является сверхвысоким. В этом случае свойства поверхностей, которые свободны от газа, особо не меняются.



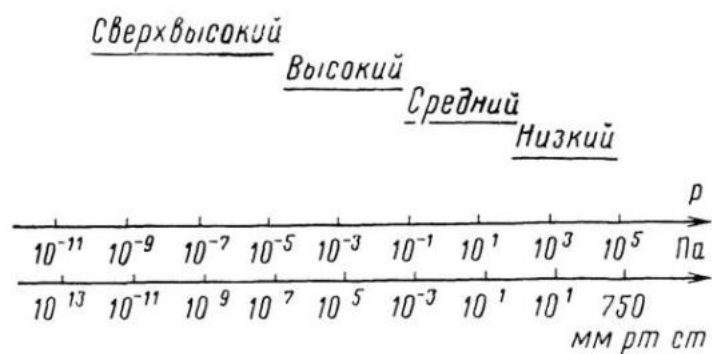


Рисунок 1 – Области давлений, соответствующие различному вакууму

Четких границ данная система разделения степеней вакуума не имеет. Возможны случаи, когда при разных обстоятельствах значения давления газа могут соответствовать разным видам вакуума в камере.

## 1.2 Элементы вакуумной системы

Все вакуумные системы используются для обеспечения заданного вакуума, а также его долговременного поддержания. Вакуумные системы часто являются сложными и состоят из множества устройств, приборов и оборудования. Например, приборы для проведения измерений давления вакуума, различные емкости и связывающие их трубопроводы. Вакуумные насосы являются одними из важнейших элементов. За счет насосов производится уменьшение молекулярной концентрации газа, другими словами производится удаление газа, ограниченного сосудом.

Вакуумные системы создаются с помощью высоковакуумных насосов и форвакуумных насосов (предварительного разряжения). Сложные вакуумные системы содержат в себе два и более вакуумных насоса, которые соединены параллельно или последовательно между собой и с регуляторами давления, вакуумметрами, а также ловушками.

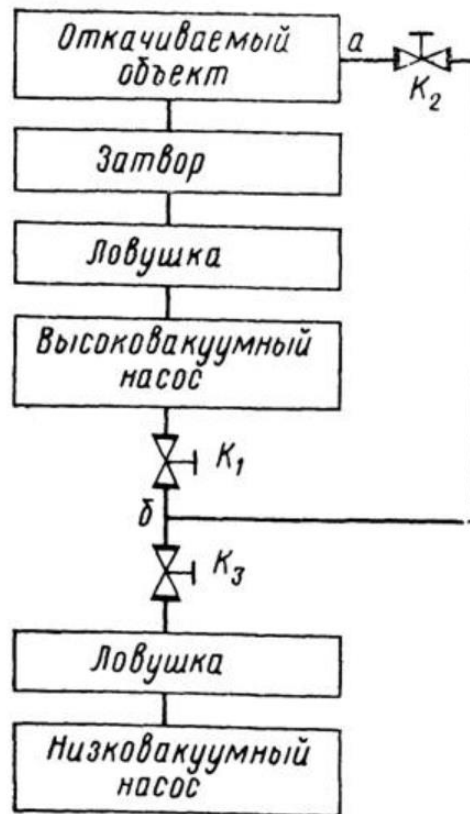


Рисунок 2 – Схема простейшей вакуумной системы

На рисунке 2 показана одна из наиболее распространенных схем вакуумной системы. Эта системы включает в себя последовательно соединенные высоковакуумные и форвакуумные (низковакуумные или средневакуумные) насосы. Форвакуум представляет собой предварительный вакуум. Предварительный вакуум создается насосами более низкого давления, чем высоковакуумные насосы. Чтобы обеспечить максимально чистый вакуум, перед насосами установлены ловушки.

Ловушки позволяют исключить попадание паров рабочего низковакуумного насоса вещества внутрь высоковакуумного насоса и, соответственно, в объем откачиваемого сосуда.

Для того, чтобы регулировать поток газа в системе установлены различные клапаны, вентили и затворы.

На рисунке 2 между точками а и б расположена байпасная линия. Эта линия трубопроводов идет от низковакуумного насоса в откачиваемый сосуд.

За счет установленной байпасной линии в данной системе есть возможность проводить откачку сосуда от атмосферного давления  $10^5$  Па до низкого вакуума. При этом поток откачиваемого газа не попадает в высоковакуумный насос.

Использование внутри откачиваемого сосуда установки тепловакуумных испытаний позволяет проводить исследования объекта на его тепловые балансы, для чего исследуется распределение температур на тепловой модели объекта, которая совершенствуется до удовлетворительного результата.

Чтобы проводить испытания объекта при экстремальных температурах необходимо использовать установки температурно-вакуумных испытаний.

### **1.3 Вакуумная камера**

Вакуумная камера – одна из основных частей вакуумной системы.

Вакуумные камеры могут использоваться для создания заданных параметров условий исследования объекта, таких как чистота, влажность и т.д.

Для проведения корректных испытаний и выполнения всех поставленных задач испытаний конструкция вакуумной камеры должна обеспечивать необходимые значения рабочих, предельных и остаточных значений давления.

Также необходимо при создании вакуумной системы учитывать временные затраты. Таким образом, скорость откачки и подготовки к испытаниям должна соответствовать значениям заданного времени.

Чтобы учесть вышеперечисленные требования расчеты всех вакуумных систем начинают с определения значений суммарного потока откачиваемого газа. Исходя из этой величины, производят расчет быстроты откачки системы. Далее производится выбор насосов каждой системы откачки.

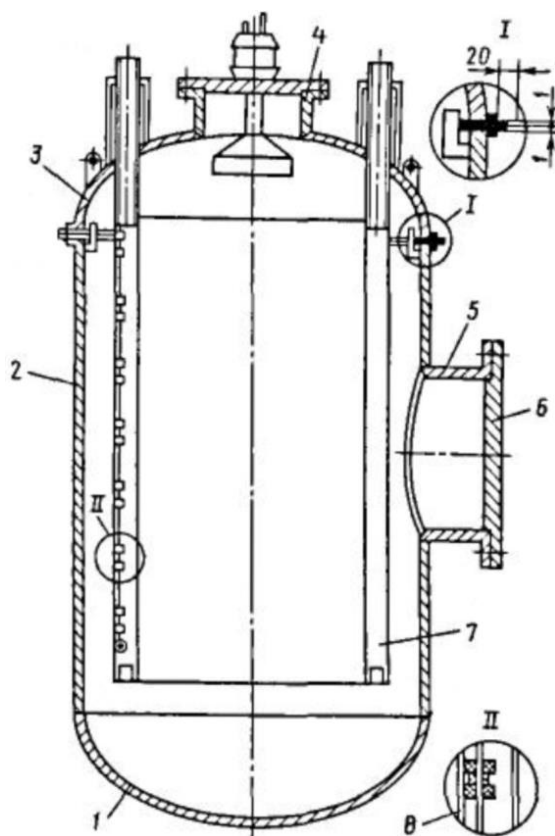


Рисунок 3 – Высоковакуумная камера: 1-днище, 2-цилиндрическая обечайка, 3- днище-крышка, 4,5-патрубки, 6-фланец, 7-внутренний полый сосуд, 8- нагреватель

Чтобы определить значения величины потока газов необходимо определить объем и внутреннюю площадь вакуумной камеры, а также необходимо изучить другие параметры установки, которые могут влиять на значение данной величины.

Вакуумные камеры можно классифицировать по степени рабочего давления вакуума. Их можно разделить на низковакуумные, высоковакуумные и сверхвысоковакуумные.

Вакуумные камеры состоят из таких основных элементов, как, например, цилиндрические обечайки, эллиптические днища, съемные крышки, патрубки, а также фланцы.

#### 1.4 Обечайки

Во многих случаях атмосферное давление  $10^5$  Па является равномерно распределенной нагрузкой, которая действует на вакуумную камеру, поэтому

толщина обечайки может быть сравнительно небольшой. Обечайки, патрубки, разборные фланцевые соединения чаще всего являются осесимметричными. Осесимметричные конструкции обладают приоритетом в процессе конструирования. В зависимости от заданных параметров, габаритов объекта испытаний и задач камеры могут иметь различные формы. Они могут быть сферическими, цилиндрическими, коническими, коробчатыми или эллиптическими.

Чтобы сделать вакуумную камеру более универсальной для проведения испытаний разных задач при проектировании отдают предпочтение камерам вертикального типа, которые имеют возможность ставить дополнительные части цилиндрической обечайки с фланцевыми соединениями под съемной крышкой.

### 1.5 Оборудование для терморегулирования

Широко популярны наружные нагреватели. Например, коробчатый нагреватель, который имеет простую конструкцию (Рисунок 4).

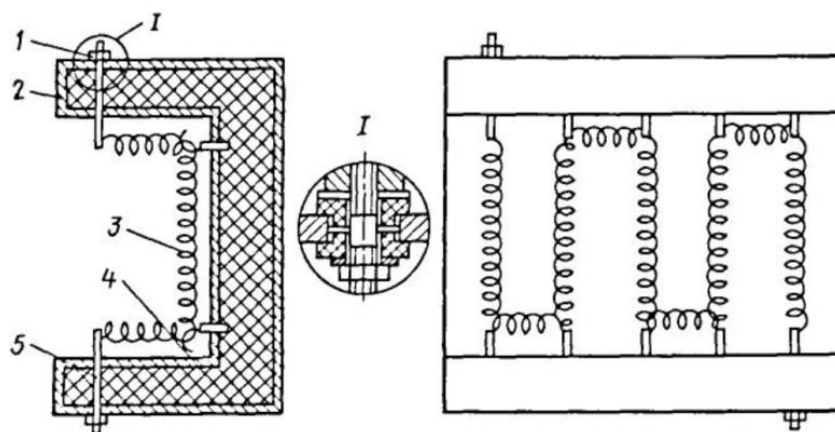


Рисунок 4 – Коробчатый нагреватель: 1-токопровод, 2-корпус, 3-нихромовая спираль, 4-теплоизоляция, 5-асбоцементная плита

Исходя из опыта работы предприятий было определено, что более удобными и компактными являются нагреватели из керамических трубок, которые содержат в себе проволоку из нихрома. (Рисунок 5).

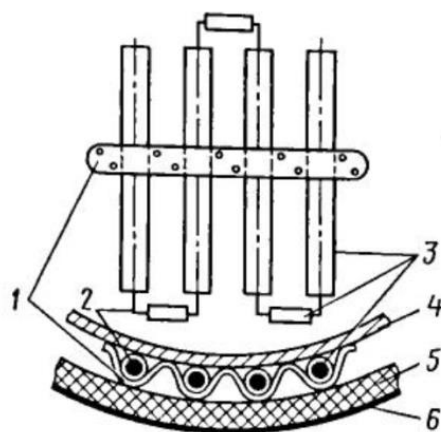


Рисунок 5 – Схема нагревателя: 1-лента для крепления керамических трубок, 2-проволока из нихрома, 3-керамические трубки, 4-обечайка, 5-теплоизоляция, 6-фольга

## 1.6 Насосы

Для создания форвакуума часто используются водокольцевые, пластинчато-роторные, роторно-поршневые, золотниковые, винтовые и спиральные насосы. Широко применяются насосы безмасляных типов, чтобы вакуум не загрязнялся парами масла.

Цель работы форвакуумного насоса заключается в создании оптимальных рабочих условий для основных насосов, а также поддержании необходимого давления в самой установке.

В качестве высоковакуумных и сверхвысоковакуумных насосов используют турбомолекулярные насосы и крионасосы.

Турбомолекулярные вакуумные насосы (Рисунок 6) используются для откачивания газов в области давлений до  $10^{-8} \dots 10^{-10}$  Па. Насосы данного типа не загрязняют откачиваемый объем парами масел или другими рабочими телами в отличие от диффузионных насосов; имеют быстроту действия, мало изменяющуюся при откачивании газов и паров с различной молекулярной массой; просты в обслуживании; надежны в работе; стойки к порыву атмосферного воздуха.

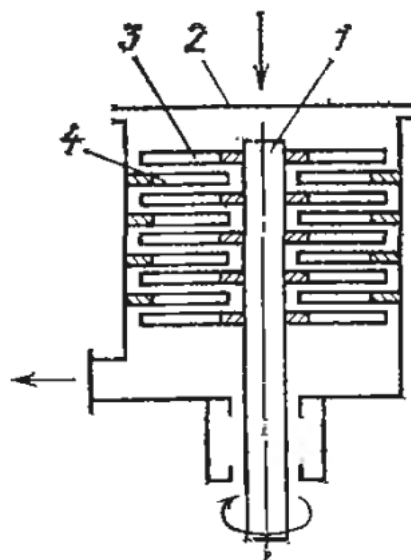


Рисунок 6 – Конструктивная схема турбомолекулярного насоса: 1-ротор, 2-корпус, 3-рабочие колеса, 4-неподвижные статорные диски

Для корректной работы турбомолекулярных насосов будем использовать золотниковые (плунжерные) насосы. Среди основных преимуществ золотниковых насосов вакуумного типа можно выделить: отсутствие большого количества областей, в которых может нарушиться показатель герметичности; низкие показатели трения подвижных элементов; минимальное вредное пространство.

При работе с криогенными насосами, представленными на рисунке 7, используются низкие температуры, например, температура жидкого азота. Остаточные газы за счет низких температур конденсируются на специально созданной криогенной панели или головке. Криогенная поверхность находится в корпусе криогенного насоса. Также криогенная поверхность в виде панелей может устанавливаться в откачиваемом объеме, то есть внутри вакуумной камеры.

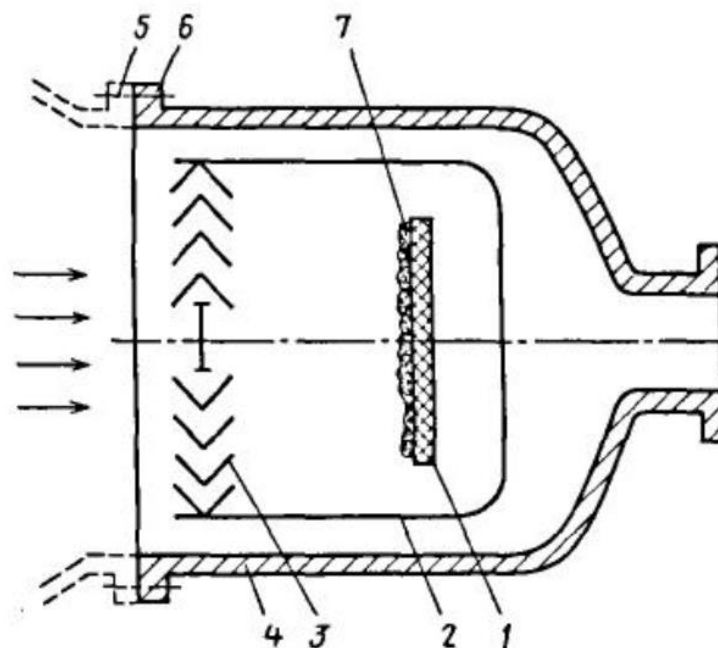


Рисунок 7 – Конструктивная схема криогенного насоса: 1-криопанель, 2-экран, 3-жалюзи, 4-корпус, 5 и 6-фланцы камеры и насоса, 7-конденсат (криоосаждок)

Низкая температура криопанели может соответствовать криогенной температуре, то есть температуре ниже  $-153^{\circ}\text{C}$ . Температура ниже данного значения должна соответствовать условиям поставленных задач.

### 1.7 Вакуумные ловушки

Ловушка – устройство, которое предназначено для удерживания паров рабочих жидкостей насоса или других газов. Цель работы ловушек – предотвращения проникновения газов и паров из одной части вакуумной системы в другую. Также они могут использоваться в качестве устройства для снижения и парциального давления. Они необходимы в вакуумных системах для получения высокого вакуума, свободного от органических соединений и других конденсирующихся паров.

Основными типами вакуумных ловушек являются механические, низкотемпературные и адсорбционные высоковакуумные.

### 1.8 Течеискатели

При изготовлении вакуумной системы необходимо проверить ее герметичность, отыскать и устранить имеющиеся течи. Но невозможно



достигнуть полного отсутствия течей, т.е. идеальной герметичности. Поэтому в зависимости от технологических требований к установке, объема системы и от производительности средств откачки, выбирается величина допустимого натекания. Основными видами являются галоидные и масс-спектрометрические течеискатели.

### **1.9 Запорно-регулирующая вакуумная арматура**

По принципу работы запорно-регулирующую арматуру разделяют на запирающую и дозирующую.

К запирающим устройствам относят краны, затворы, клапаны и вентили, которые в зависимости от условий работы выполняются с резиновыми, фторопластовыми или металлическими уплотнениями.

Для плавного регулирования давления в установке напуском в нее атмосферного воздуха или газа используют дозирующие устройства. К ним относятся порционные краны и дроссели.

## 2 ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

### 2.1 Расчет газовых нагрузок

Необходимо рассчитать величину потока газов:

$$Q_{\Sigma} = Q_{изд} + Q_{газ} + Q_{нат}. \quad (1)$$

Поток газов  $Q_{изд}$ , выделяющихся из объекта испытаний, определим по формуле:

$$Q_{изд} = \frac{G \cdot q_{газ} \cdot \xi}{t}, \quad (2)$$

где  $G = 1000 \text{ кг}$  - масса объекта испытаний;

$q_{газ} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{м}^2 \text{ с}$  - удельное количество газа, который выделяется с поверхности алюминия;

$$\xi = 1,5 \dots 3;$$

$t_{откач} = 36 \text{ часов}$  - количество времени полной откачки камеры по заданию.

Подставим значения в выражение (2):

$$Q_{изд} = \frac{1000 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 3}{36 \cdot 3600} = 0,139 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{с}.$$

Рассчитаем поток газов  $Q_{газ}$ , выделяющихся с поверхностей элементов вакуумной камеры:

$$Q_{газ} = Q_{обеч} + Q_{днищ1} + Q_{днищ2} + Q_{днищ3} + Q_{отр} + Q_{ламп} + Q_{констр} + Q_{криопан} + Q_{штуц}. \quad (3)$$

Поток газов, выделяющихся с внутренней поверхности обечайки:

$$Q_{обеч} = \pi \cdot d \cdot h \cdot q_{обеч} \quad (4)$$

где  $D = 20 \text{ м}$ ;  $h = 20 \text{ м}$ ;

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

Подставим значения в выражение (4):

$$Q_{обеч} = \pi \cdot 20 \cdot 20 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 1,508 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ с};$$

Поток газов, выделяющихся с внутренней поверхности днища 1:

$$Q_{днищ1} = 2\pi \cdot R \cdot h \cdot q_{днищ}; \quad (5)$$

где  $R = 10 \text{ м}$ ;  $h = 5 \text{ м}$ ;

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

Подставим значения в выражение (5):

$$Q_{днищ1} = 2\pi \cdot 10 \cdot 5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 3,77 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ с}.$$

Поток газов, выделяющихся с внутренней поверхности днища 2:

$$Q_{днищ2} = 2\pi \cdot R \cdot h \cdot q_{днищ}; \quad (6)$$

где  $R = 10 \text{ м}$ ;  $h = 5 \text{ м}$ ;

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

Подставим значения в выражение (6):

$$Q_{днищ2} = 2\pi \cdot 10 \cdot 5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 3,77 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ с}.$$

Поток газов, выделяющихся с внутренней поверхности днища 3:

$$Q_{днищ3} = 2\pi \cdot R \cdot h \cdot q_{днищ}; \quad (7)$$

где  $R = 5 \text{ м}$ ;  $h = 2 \text{ м}$ ;

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

Подставим значения в выражение (7):

$$Q_{\text{дншц}} = 2\pi \cdot 5 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 7,54 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ с}.$$

Поток газов, выделяющихся с внутренней поверхности штуцера:

$$Q_{\text{штуц}} = \pi \cdot D \cdot h \cdot q_{\text{штуц}}; \quad (8)$$

где  $D = 10 \text{ м}$ ;  $h = 8,667 \text{ м}$ ;

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

Подставим значения в выражение (8):

$$Q_{\text{штуц}} = 2\pi \cdot 10 \cdot 8,667 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 3,267 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ с}.$$

Поток газов, выделяющихся с внутренней поверхности конструкций, находящихся внутри камеры:

$$Q_{\text{констр}} = S_{\text{констр}} \cdot q_{\text{констр}}; \quad (9)$$

где  $S_{\text{констр}} = 1055,62 \text{ м}^2$  - площадь поверхности конструкции;

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

Подставим значения в выражение (9):

$$Q_{\text{констр}} = 1055,62 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 1,267 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ с}.$$

Поток газов, выделяющихся с поверхности криопанелей:

$$Q_{\text{криопан}} = S_{\text{криопан}} \cdot q_{\text{криопан}}; \quad (10)$$

где  $S_{\text{криопан}} = 2 \cdot 9,5 \cdot 6 = 342 \text{ м}^2$  - площадь поверхности криопанели;

$q_{\text{итупц}} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ м}^2 \text{ с}$  - удельное газовыделение криопанели.

Подставим значения в выражение (10) с учетом того, что необходимо установить 3 криопанели:

$$Q_{\text{криопан}} = 3 \cdot 342 \cdot 4 \cdot 10^{-10} = 1,368 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ с}.$$

Поток газов, выделяющихся с поверхности отражателя:

$$Q_{\text{отраж}} = S_{\text{отраж}} \cdot q_{\text{отраж}}; \quad (11)$$

где  $S_{\text{отраж}} = 20 \cdot 5 = 100 \text{ м}^2$  - площадь поверхности отражателя;

$q_{\text{отраж}} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ м}^2 \text{ с}$  - удельное газовыделение алюминия.

Подставим значения в выражение (11):

$$Q_{\text{отраж}} = 100 \cdot 1,4 \cdot 10^{-4} = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ с}.$$

Поток газов, выделяющихся с поверхности инфракрасных ламп:

$$Q_{\text{ламп}} = S_{\text{ламп}} \cdot q_{\text{стекло}}; \quad (12)$$

где  $S_{\text{ламп}} = 2\pi R(h + R) = 2\pi \cdot 0,07(0,14 + 0,07) = 9,236 \text{ м}^2$  - площадь поверхности отражателя;

$q_{\text{стекло}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ Па} / \text{ м}^2 \text{ с}$  - удельное газовыделение алюминия.

Подставим значения в выражение (12) с учетом того, что необходимо установить инфракрасные лампы мощностью – 500 Вт, диаметром и длиной – 140 мм:

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

Рассчитаем поток газов по формуле (3):

$$Q_{\text{газ}} = 1,5 \cdot 10^{-5} + 3,77 \cdot 10^{-6} + 3,77 \cdot 10^{-6} + 7,54 \cdot 10^{-7} + 0,014 + 1,847 \cdot 10^{-4} + 1,26 \cdot 10^{-5} + 1,368 \cdot 10^{-7} + 3,267 \cdot 10^{-6} = 0,014 \text{ м}^3 \text{ Па/с}.$$

Рассчитаем величину газового потока, через неплотности в узлах соединения камеры. Число возможных мест натекания -  $n = 7$ . Проверка течей осуществляется масс-спектрометрическим течеискателем, чувствительность которого равна  $\gamma = 7 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ .

$$Q_{\text{нат}} = n \cdot \gamma = 7 \cdot 7 \cdot 10^{-12} = 4,9 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ Па/с}. \quad (13)$$

Суммарный газовый поток находим по формуле (3):

$$Q_{\Sigma} = 0,139 \cdot 10^{-6} + 0,014 + 4,9 \cdot 10^{-11} = 0,014 \text{ м}^3 \text{ Па/с}.$$

## 2.2 Выбор вакуумной схемы

На рисунке (8) изображена схема вакуумной системы. В качестве сверхвысоковакуумных насосов используются криогенные насосы. Они располагаются отдельно от остальных, так как для них не нужны определенные условия давления в вакуумной камере.

Для корректной работы высоковакуумных турбомолекулярных насосов необходимо эксплуатировать их вместе со средневакуумными насосами.

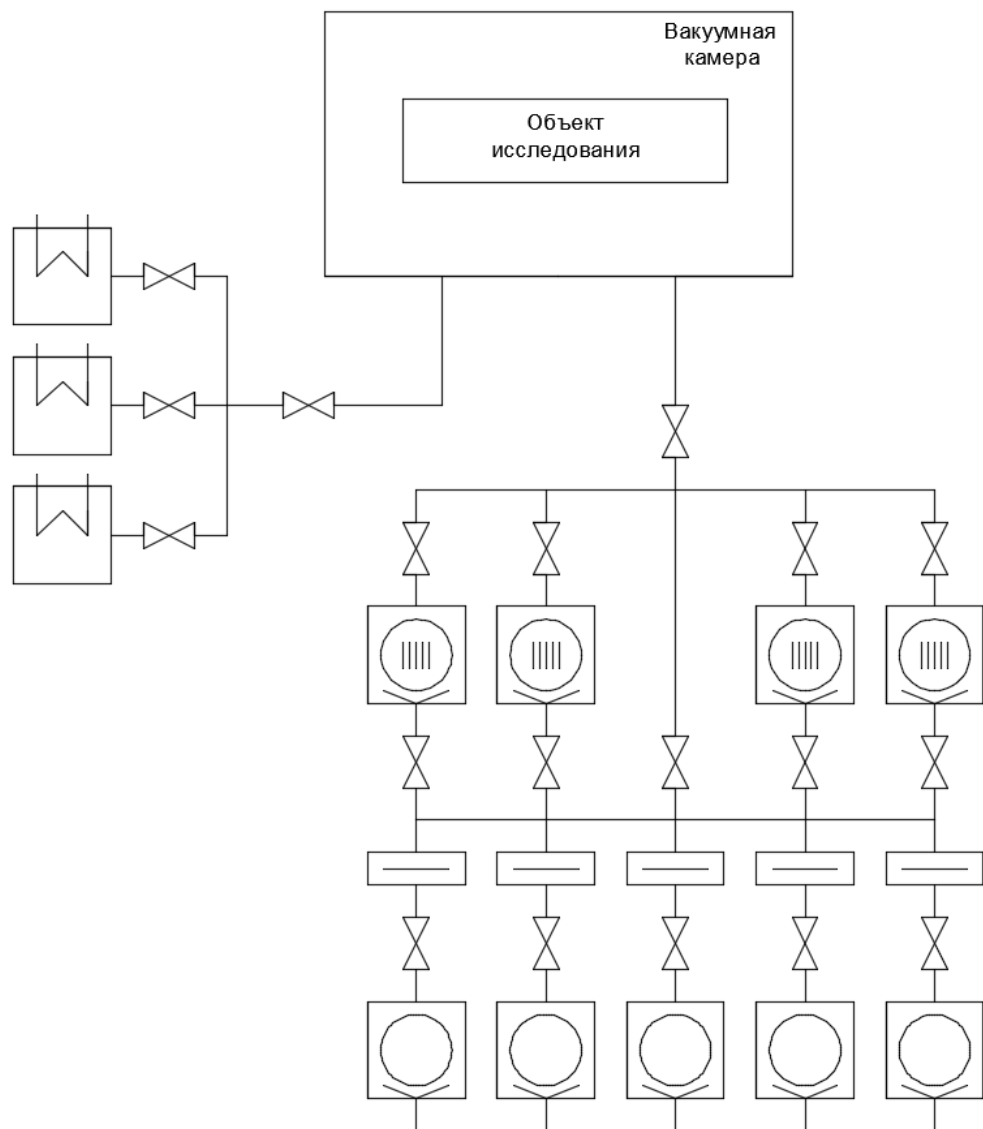


Рисунок 8 – Схема вакуумной системы и систем откачки

## 2.3 Выбор вакуумных насосов

### 2.3.1 Выбор сверхвысоковакуумного насоса

Определим необходимую быстроту откачки до давления  $P_{исп} = 10^{-6} \text{ Па}$  :

$$S_{эф1} = \frac{Q_{\Sigma}}{P_{исп}} = \frac{0,014}{10^{-6}} = 1,422 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (14)$$

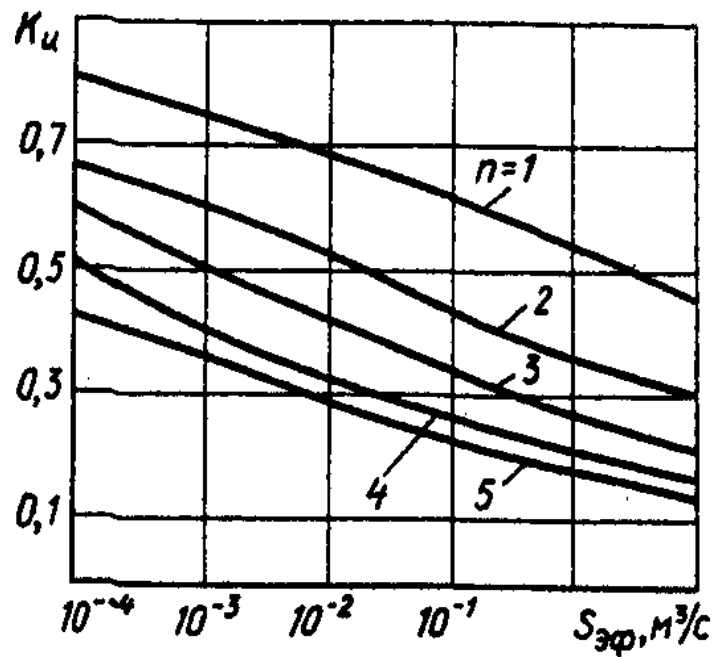


Рисунок 9 – График оптимальных коэффициентов использования сверхвысоковакуумных насосов

На рисунке (9) представлен график коэффициентов использования сверхвысоковакуумных насосов, по которому определяем, что при  $n = 5$  - число элементов в схеме между насосом и откачиваемым объектом, оптимальное значение коэффициента использования  $K_{u1} = 0,02$ .

Определяем номинальную быстроту откачки:

$$S_{m1} = \frac{Q_{\Sigma}}{(K_{u1} \cdot p_1 - P_{усп})} = \frac{0,014}{(0,02 \cdot 10^{-2} - 10^{-6})} = 71,479 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (15)$$

По быстроте откачки выбираем криогенный насос HSR VELCO 801, который имеет следующие характеристики:

$S_1 = 28 \text{ м}^3/\text{с}$  - скорость откачки;

$t = 180 \text{ мин}$  - время захолаживания;

$D = 800 \text{ мм}$  - диаметра входного патрубка.

Определяем количество насосов:



$$N = \frac{S_{m1}}{S_1} = \frac{71,479}{28} = 2,5 \approx 3 \text{ шт.} \quad (16)$$

Включаем три криогенных насоса в состав вакуумной системы.

Предельное давление насоса определим через уравнение (17):

$$p_u = \frac{1}{2} \cdot P_{осм} \left(1 + \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}\right), \quad (17)$$

где  $T_1 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$ ;

$T_2 = -196^\circ\text{C} = 77 \text{ K}$ ;

$$p_u = \frac{1}{2} \cdot 10^{-8} \left(1 + \sqrt{\frac{293}{77}}\right) = 1,475 \cdot 10^{-8} \text{ Па.}$$

Коэффициент застревания газов на криопанели находим по формуле (18):

$$f = 0,453 + 0,256 \cdot \log_{10} M = 0,453 + 0,256 \cdot \log_{10} 29 = 0,827. \quad (18)$$

где  $M = 29 \text{ г/моль}$  - молярная масса воздуха.

Коэффициент равен:

$$\alpha = \sqrt{\frac{2 \cdot g_c \cdot R_u \cdot T_1}{\pi \cdot M}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 8,314 \cdot 293}{\pi \cdot 29}} = 7,313 \text{ м/с}; \quad (19)$$

Определяем значение параметра G:

$$G = (1-f) \cdot \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \cdot \left(1 - \frac{p_u}{P_{осн}}\right) = (1-0,83) \cdot \sqrt{\frac{293}{77}} \cdot \left(1 - \frac{1,475 \cdot 10^{-8}}{10^{-6}}\right) = 0,334 \quad (20)$$

Находим быстроту откачки:

$$\frac{S_p}{A} = \frac{\alpha \cdot (1 - \frac{P_u}{P_{ucn}}) \cdot f}{1 + \frac{P_u}{P_{ucn}} \cdot (\sqrt{\frac{T_1}{T_2}} - 1) + G} = \frac{7,313 \cdot (1 - \frac{1,475 \cdot 10^{-8}}{10^{-6}}) \cdot 0,827}{1 + \frac{1,475 \cdot 10^{-8}}{10^{-6}} \cdot (\sqrt{\frac{293}{77}} - 1) + 0,334} = 4,421 \text{ м/с.} \quad (21)$$

Вычислим необходимую площадь поверхности криопанели:

$$A = \frac{S_{m1}}{4,421} = \frac{71,479}{4,421} = 16,16 \text{ м}^2. \quad (22)$$

### 2.3.2 Выбор высоковакуумного насоса

Эффективную быстроту откачки определяем по зависимости:

$$S_{эф2} = \frac{Q_{\Sigma}}{P_2} = \frac{0,014}{10^{-6}} = 1,422 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (23)$$

На рисунке (10) представлен график коэффициентов использования высоковакуумных насосов. По графику определяем, что при  $n=5$  – число элементов в схеме вакуумной системы между насосом и откачиваемым объектом, оптимальное значение коэффициента использования  $K_{u2} = 0,045$ .

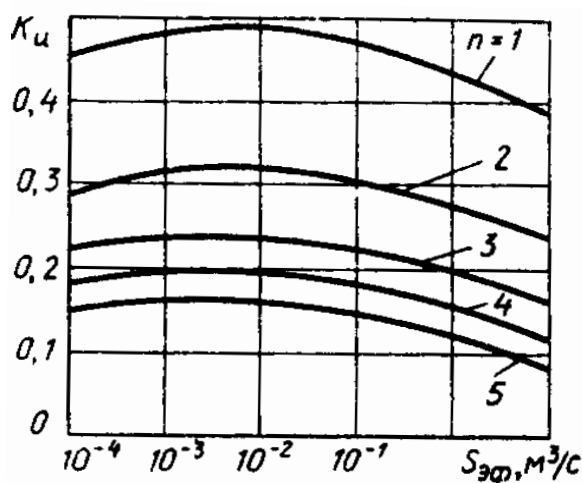


Рисунок 10 – График оптимальных коэффициентов использования высоковакуумных насосов

Необходимая быстрота откачки:

$$S_{m2} = \frac{Q_{\Sigma}}{(K_{u2} \cdot P_2 - P_{исп})} = \frac{0,014}{(0,045 \cdot 10^{-2} - 10^{-6})} = 25,12 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (24)$$

По быстроте откачки выбираем Shimadzu FT-6300 WH. Это турбомолекулярный насос, который имеет характеристики:

$S_2 = 6,3 \text{ м}^3/\text{с}$  - скорость откачки;

$P_{ост} = 10^{-8} \text{ Па}$  - предельное остаточное давление;

$D = 625 \text{ мм}$  - диаметр входного патрубка;

$d = 410 \text{ мм}$  - диаметр выходного патрубка;

$P_{вых} = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$  - максимальное давление на выходе;

$M = 205 \text{ кг}$  - масса насоса.

Определяем количество насосов:

$$N = \frac{S_{m2}}{S_2} = \frac{25,12}{6,3} = 3,9 \approx 4 \text{ шт}. \quad (25)$$

Включаем четыре турбомолекулярных насоса в состав вакуумной системы.

### 2.3.3 Выбор средневакуумного насоса

По максимальному давлению на выходе турбомолекулярного насоса выбираем рабочее давление средневакуумного насоса. С учетом коэффициента запаса  $\varphi = 2$  рабочее давление будет равным:  $P_3 = 1,8 \cdot 10^{-2} / 2 = 0,9 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ .

Эффективную быстроту откачки определяем по зависимости:

$$S_{эф3} = \frac{Q_{\Sigma}}{P_3} = \frac{0,014}{0,9 \cdot 10^{-2}} = 1,58 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (26)$$

На рисунке (11) представлен график коэффициентов использования средневакуумных насосов. По графику определяем, что при  $n=5$  – число элементов в схеме вакуумной камеры между насосом и откачиваемым объектом, оптимальное значение коэффициента использования  $K_{и3} = 0,97$ .

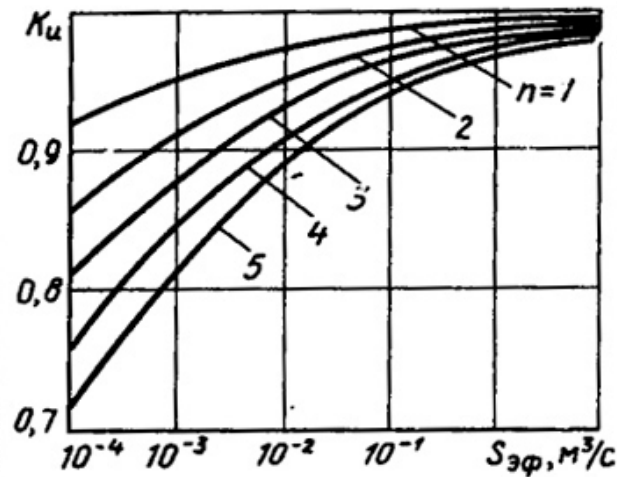


Рисунок 11 – График оптимальных коэффициентов использования средневакуумных насосов

Определяем номинальную быстроту откачки:

$$S_{m3} = \frac{Q_{\Sigma}}{(K_{и3} \cdot P_3 - P_{исн})} = \frac{0,014}{(0,97 \cdot 9 \cdot 10^{-3} - 10^{-4})} = 1,84 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (27)$$

По значению быстроты действия выбираем золотниковый насос НВЗ-500, имеющий следующие характеристики:

$S_3 = 0,56 \text{ м}^3/\text{с}$  - скорость откачки;

$P_{ост} = 10^{-2} \text{ Па}$  - предельное остаточное давление;

$M = 4000 \text{ кг}$  - масса насоса.

Определяем количество насосов:

$$N = \frac{S_{m3}}{S_3} = \frac{1,84}{0,56} = 3,27 \approx 4 \text{ шт}. \quad (28)$$

Включаем четыре насоса в состав вакуумной системы и один резервный.

Необходимо проверить возможность использования турбомолекулярных и золотниковых насосов для откачки вакуумной камеры. Форвакуумная откачка должна идти до давления  $10^{-1}$  Па за 15 часов. Высоковакуумная откачка должна идти до давления  $10^{-6}$  Па за 36 часов. Объем камеры составляет  $V = 7793 \text{ м}^3$ .

Учитывая, что для механических насосов коэффициент использования равен  $\varphi = 1,1 \div 1,25$ , рассчитаем скорость форвакуумной откачки:

$$S_{\text{фор}} = \frac{4 \cdot S_3}{\varphi} = \frac{4 \cdot 0,56}{1,1} = 2,04 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (29)$$

Время форвакуумной откачки найдем по формуле (30):

$$t_{\text{фор}} = \frac{V}{S_{\text{фор}}} \cdot \ln \left( \frac{p_{\text{нач}} - \frac{Q_{\Sigma}}{S_{\text{фор}}}}{p - \frac{Q_{\Sigma}}{S_{\text{фор}}}} \right), \quad (30)$$

где  $p_{\text{нач}} = 10^5$  Па - начальное давление в камере.

$$t_{\text{фор}} = \frac{7793}{2,04} \cdot \ln \left( \frac{10^5 - \frac{0,014}{2,04}}{10^{-1} - \frac{0,014}{2,04}} \right) = 4,41 \cdot 10^4 \text{ с} = 12 \text{ часов}, 14 \text{ минут}.$$

Расчетное время форвакуумной откачки (12 часов, 14 минут) меньше заданного (15 часов), что удовлетворяет требованиям по условиям задания.

Время высоковакуумной откачке рассчитаем с помощью формулы (31):

$$t_{\text{выс}} = 2,3 \cdot \frac{V}{4 \cdot S_{\text{фор}} \cdot K_{u2}} \cdot \lg \left( \frac{p_1}{p_2} \right), \quad (31)$$

$$t_{\text{выс}} = 2,3 \cdot \frac{7793}{4 \cdot 6,3 \cdot 0,045} \cdot \lg\left(\frac{10^{-1}}{10^{-6}}\right) = 21 \text{ час}, 57 \text{ мин} \approx 22 \text{ часа}.$$

Расчетное время высоковакуумной откачки (22 часа). Это на 14 часов меньше заданного времени (36 часов). Получившееся значение удовлетворяет заданию.

## 2.4 Определение конструктивных размеров трубопроводов и выбор элементов вакуумной системы.

### 2.4.1 Сверхвысоковакуумная система

Сначала необходимо определить общую проводимость от криогенных насосов до вакуумной камеры. Схема сверхвысоковакуумной системы представлена на рисунке 12.

$$U_1 = \frac{S_{m1} \cdot K_{u1}}{(1 - K_{u1})} = \frac{71,479 \cdot 0,02}{(1 - 0,02)} = 1,459 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (32)$$

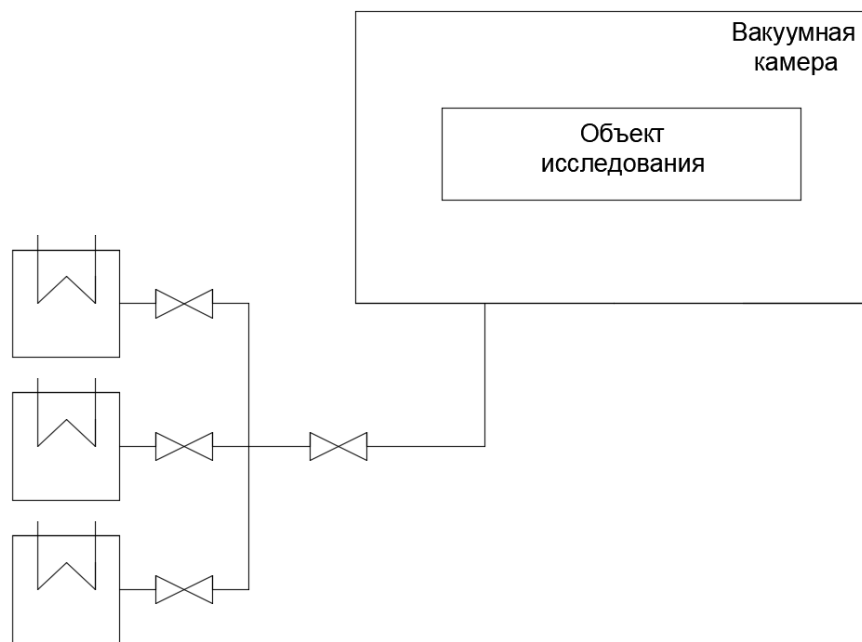


Рисунок 12 – Схема сверхвысоковакуумной системы

Участок вакуумной системы состоит из пяти элементов. В первом приближении примем, что все элементы имеют одинаковую проводимость,

тогда:

$$U_{1x} = 5 \cdot U_1 = 5 \cdot 1,459 = 7,294 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (33)$$

По значениям рабочего давления  $P_1 = 10^{-6} \text{ Па}$  и диаметру входного патрубка насоса  $d_{\text{ex}} = 0,9 \text{ м}$  мы можем определить режим течения газа в трубопроводе. Необходимо также учесть критерий Кнудсена:

$$K_n = \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{P_1 \cdot d_{\text{ex}}} = \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{10^{-6} \cdot 0,9} = 8,33 \cdot 10^3 > 1,5, \quad (34)$$

т.е. режим течения молекулярный.

Проводимость первого трубопровода находим с помощью длины  $L_1 = 13,5 \text{ м}$  и диаметра  $d_1 = 1 \text{ м}$ :

$$U_{11} = \frac{121 \cdot d_1^3}{L_1} = \frac{121 \cdot 1^3}{13,5} = 8,963 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (35)$$

В качестве вакуумного затвора используем ЗВЭ-1000. Диаметр условного прохода  $d_y = 1 \text{ м}$ . Проводимость в молекулярном режиме течения газа  $U_{12} = 242,2 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Длина третьего элемента -  $L_3 = 6 \text{ м}$ , диаметр -  $d_3 = 1 \text{ м}$ , длина коллектора -  $L_{\kappa} = 3,5 \text{ м}$ , диаметр -  $d_{\kappa} = 0,9 \text{ м}$ . Проводимость второго трубопровода:

$$U_{13}^1 = \frac{38,1 \cdot d_3^3}{L_3} \sqrt{\frac{T_1}{M}} = \frac{38,1 \cdot 1^3}{6} \sqrt{\frac{293}{29}} = 20,184 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (36)$$

$$U_{13}^2 = \frac{38,1 \cdot d_{\kappa}^3}{L_{\kappa}} \sqrt{\frac{T_1}{M}} = \frac{38,1 \cdot 0,9^3}{3,5} \sqrt{\frac{293}{29}} = 25,224 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (37)$$

$$U_{13} = \frac{1}{\frac{1}{U_{13}^1} + \frac{1}{U_{13}^2}} = \frac{1}{\frac{1}{20,184} + \frac{1}{25,224}} = 11,212 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (38)$$

Будем использовать ЗВЭ-800. Диаметр условного прохода  $d_y = 0,8 \text{ м}$ . Проводимость в молекулярном режиме течения газа  $U_{14} = 167,58 \text{ м}^3/\text{с}$ . Площадь отверстия затвора:

$$S_{отв} = \pi \cdot R^2 = \pi \cdot 0,4^2 = 0,503 \text{ м}^2. \quad (39)$$

Определим проводимость отверстия затвора:

$$U_{отв} = 36,4 \cdot S \cdot \sqrt{\frac{T_1}{M}} = 36,4 \cdot 0,503 \cdot \sqrt{\frac{293}{29}} = 58,158 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (40)$$

Длина пятого элемента -  $L_5 = 1 \text{ м}$ , диаметр -  $d_5 = 0,9 \text{ м}$ , тогда проводимость пятого трубопровода:

$$U_{15} = 38,1 \cdot \frac{d_5^3}{L_5} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{M}} = 38,1 \cdot \frac{0,9^3}{1} \cdot \sqrt{\frac{293}{29}} = 88,285 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (41)$$

Общая проводимость участка:

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{U_{11}} + \frac{1}{U_{12}} + \frac{1}{U_{13}} + \frac{1}{U_{14}} + \frac{1}{U_{15}}} = \frac{1}{\frac{1}{8,963} + \frac{1}{242,2} + \frac{1}{11,212} + \frac{1}{167,58} + \frac{1}{88,285}} = 4,501 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (42)$$



Рассчитаем распределение давления на участке вакуумной системы от криогенных насосов до вакуумной камеры.

Значение давления во входном сечении насоса определим по формуле (43):

$$P_{н1} = p_{нп1} + \frac{Q}{S_{m1}} = 10^{-8} + \frac{0,014}{71,479} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (43)$$

Перепад давления в трубопроводе элемента 5:

$$\Delta p_5 = \frac{Q}{U_{15}} = \frac{0,014}{88,285} = 1,61 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (44)$$

Давление в ЗВЭ-800:

$$\Delta p_{омв} = \frac{Q}{U_{омв}} = \frac{0,014}{58,158} = 2,45 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (45)$$

Перепад в элементе 4:

$$\Delta p_4 = \frac{Q}{U_{14}} = \frac{0,014}{167,58} = 8,49 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (46)$$

Перепад давления в трубопроводе элемента 3:

$$\Delta p_3 = \frac{Q}{U_{13}} = \frac{0,014}{11,21} = 1,27 \cdot 10^{-3} \text{ Па.} \quad (47)$$

Перепад давления в ЗВЭ-1000:

$$\Delta p_2 = \frac{Q}{U_{12}} = \frac{0,014}{242,2} = 5,87 \cdot 10^{-5} \text{ Па.} \quad (48)$$

Перепад давления в трубопроводе элемента 1:

$$\Delta p_1 = \frac{Q}{U_{11}} = \frac{0,014}{8,96} = 1,59 \cdot 10^{-3} \text{ Па.} \quad (49)$$

#### 2.4.2 Высоковакуумная система

Для высоковакуумной системы определяем проводимость участка от турбомолекулярных насосов до вакуумной камеры. Схема высоковакуумной системы представлена на рисунке (13).

$$U_2 = \frac{S_{m2} \cdot K_{u2}}{(1 - K_{u2})} = \frac{31,68 \cdot 0,045}{(1 - 0,045)} = 0,518 \text{ м}^3/\text{с.} \quad (50)$$

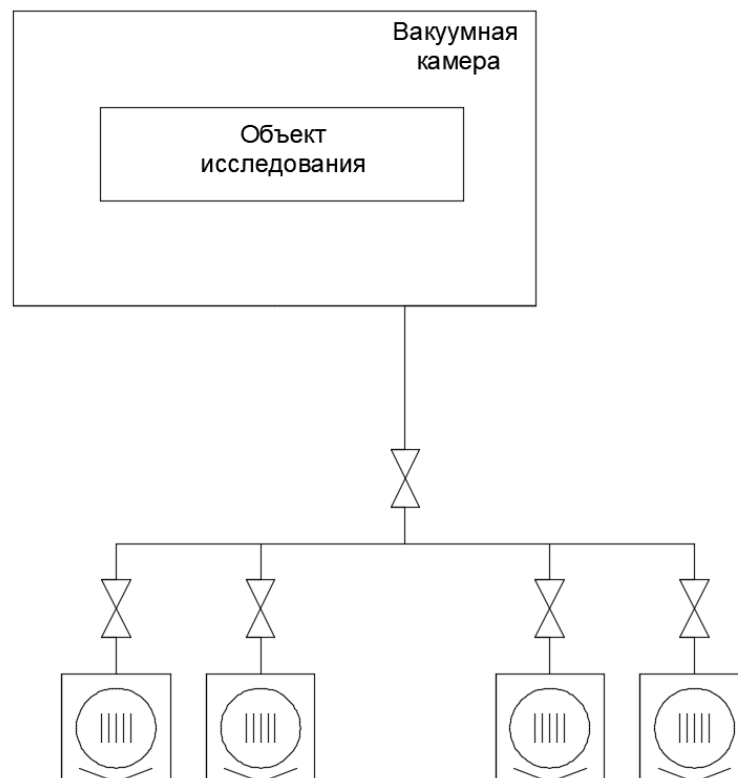


Рисунок 13 – Схема высоковакуумной системы

Участок вакуумной системы состоит из пяти элементов. В первом приближении примем, что все элементы имеют одинаковую проводимость, тогда:

$$U_{2x} = 5 \cdot U_2 = 5 \cdot 0,518 = 2,59 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (51)$$

По предварительному давлению  $P_2 = 10^{-2} \text{ Па}$  определим режим течения газа в трубопроводе. Диаметр входного патрубка насоса  $d_{\text{ex}} = 0,5 \text{ м}$ . Необходимо также учесть критерий Кнудсена:

$$K_n = \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{P_2 \cdot d_{\text{ex}}} = \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{10^{-2} \cdot 0,5} = 1,55 > 1,5, \quad (52)$$

т.е. режим течения молекулярный.

Проводимость первого трубопровода находим с помощью длины  $L_2 = 11,5 \text{ м}$  и диаметра  $d_2 = 1 \text{ м}$ :

$$U_{21} = \frac{121 \cdot d_2^3}{L_2} = \frac{121 \cdot 1^3}{11,5} = 10,52 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (53)$$

Будем использовать ЗВЭ-1000. Диаметр условного прохода  $d_y = 1 \text{ м}$ . Проводимость в молекулярном режиме течения газа  $U_{22} = 242,2 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Длина третьего элемента -  $L_3 = 8 \text{ м}$ , диаметр -  $d_3 = 1 \text{ м}$ , длина коллектора -  $L_k = 5 \text{ м}$ , диаметр -  $d_k = 0,5 \text{ м}$ , тогда проводимость второго трубопровода:

$$U_{23}^1 = \frac{38,1 \cdot d_3^3}{L_3} \sqrt{\frac{T_1}{M}} = \frac{38,1 \cdot 1^3}{8} \sqrt{\frac{293}{29}} = 15,138 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (54)$$

$$U_{23}^{21} = \frac{38,1 \cdot d_k^3}{L_k} \sqrt{\frac{T_1}{M}} = \frac{38,1 \cdot 0,5^3}{5} \sqrt{\frac{293}{29}} = 3,028 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (55)$$

$$U_{23}^{22} = \frac{38,1 \cdot d_k^3}{L_k} \sqrt{\frac{T_1}{M}} = \frac{38,1 \cdot 0,5^3}{2} \sqrt{\frac{293}{29}} = 7,569 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (56)$$

$$U_{23}^2 = U_{23}^{21} + 2 \cdot U_{23}^{22} = 3,028 + 2 \cdot 7,57 = 18,166 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (57)$$

$$U_{23} = \frac{1}{\frac{1}{U_{23}^1} + \frac{1}{U_{23}^2}} = \frac{1}{\frac{1}{15,138} + \frac{1}{18,166}} = 8,257 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (58)$$

Будем использовать ЗВЭ-500. Диаметр условного прохода  $d_y = 0,5 \text{ м}$ .

Проводимость в молекулярном режиме течения газа  $U_{24} = 68,81 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Длина пятого элемента -  $L_5 = 1 \text{ м}$ , диаметр -  $d_5 = 0,5 \text{ м}$ . Проводимость второго трубопровода:

$$U_{25} = 38,1 \cdot \frac{d_5^3}{L_5} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{M}} = 38,1 \cdot \frac{0,5^3}{1} \cdot \sqrt{\frac{293}{29}} = 45,414 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (59)$$

Общая проводимость участка:

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{U_{21}} + \frac{1}{U_{22}} + \frac{1}{U_{23}} + \frac{1}{U_{24}} + \frac{1}{U_{25}}} = \frac{1}{\frac{1}{10,52} + \frac{1}{242,2} + \frac{1}{8,257} + \frac{1}{68,81} + \frac{1}{45,414}} = 3,894 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (60)$$

Необходимо определить распределение давления от турбомолекулярных насосов и высоковакуумного коллектора до вакуумной камеры.

Давление во входном сечении насоса по формуле (60):

$$P_{n2} = p_{np2} + \frac{Q}{S_{m2}} = 10^{-6} + \frac{0,014}{31,68} = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (61)$$

Перепад давления в трубопроводе элемента 5:

$$\Delta p_5 = \frac{Q}{U_{25}} = \frac{0,014}{45,414} = 3,132 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (62)$$

Перепад давления в ЗВЭ-500:

$$\Delta p_4 = \frac{Q}{U_{24}} = \frac{0,014}{68,81} = 2,067 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (63)$$

Перепад давления в трубопроводе элемента 3:

$$\Delta p_3 = \frac{Q}{U_{23}} = \frac{0,014}{8,257} = 1,723 \cdot 10^{-3} \text{ Па.} \quad (64)$$

Перепад давления в ЗВЭ-1000:

$$\Delta p_2 = \frac{Q}{U_{22}} = \frac{0,014}{242,2} = 5,87 \cdot 10^{-5} \text{ Па.} \quad (65)$$

Перепад давления в трубопроводе элемента 1:

$$\Delta p_1 = \frac{Q}{U_{21}} = \frac{0,014}{10,53} = 1,352 \cdot 10^{-3} \text{ Па.} \quad (66)$$

### 2.4.3 Средневакуумная система

Для средневакуумной системы найдем общую проводимость от золотниковых насосов до турбомолекулярных насосов и высоковакуумного коллектора. Схема средневакуумной системы представлена на рисунке (14).

$$U_3 = \frac{S_{m3} \cdot K_{u3}}{(1 - K_{u3})} = \frac{1,84 \cdot 0,97}{(1 - 0,97)} = 59,493 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (67)$$

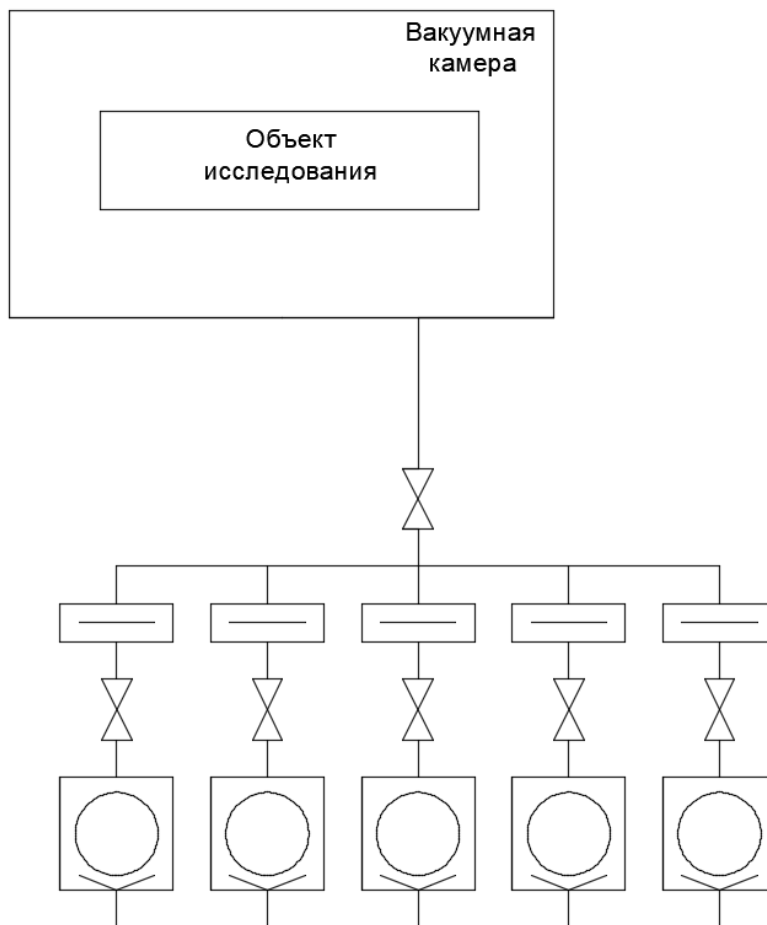


Рисунок 14 – Схема средневакуумной системы

Участок вакуумной системы состоит из семи элементов. В первом приближении примем, что все элементы имеют одинаковую проводимость, тогда:

$$U_{2x} = 7 \cdot U_2 = 7 \cdot 59,493 = 416,453 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (68)$$

По значению рабочего давления  $P_3 = 10^{-1} \text{ Па}$  и диаметру входного патрубка насоса  $d_{\text{ex}} = 0,1 \text{ м}$  определим режим течения газа в трубопроводе. Необходимо также учесть критерий Кнудсена:

$$K_n = \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{P_3 \cdot d_{\text{ex}}} = \frac{7,5 \cdot 10^{-3}}{10^{-1} \cdot 0,1} = 7,5 > 1,5, \quad (69)$$

т.е. режим течения молекулярный.

Проводимость входного отверстия патрубка ЗВЭ-1000 с диаметром  $d_{\text{омб}} = 0,1 \text{ м}$ .

$$U_{\text{омб}} = 36,4 \cdot S_{\text{омб}} \cdot \left( \frac{T_1}{M} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (70)$$

$$S_{\text{омб}} = \pi R^2 = \pi \cdot 0,05^2 = 7,854 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2; \quad (71)$$

$$U_{\text{омб}} = 36,4 \cdot 7,854 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{293}{29} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,909 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Проводимость первого трубопровода. Длина  $L_1 = 1 \text{ м}$  и диаметр  $d_1 = 0,4 \text{ м}$ :

$$U_{31} = \frac{38,1 \cdot d_1^3}{L_1} = \frac{38,1 \cdot 0,4^3}{1} = 7,751 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (72)$$

Используем ЗВЭ-400. Диаметр условного прохода  $d_y = 0,4 \text{ м}$ .

Проводимость в молекулярном режиме течения газа  $U_{32} = 46,25 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Длина третьего элемента –  $L_3 = 1 \text{ м}$ . Диаметр –  $d_3 = 0,4 \text{ м}$ . Проводимость второго трубопровода:

$$U_{33} = \frac{38,1 \cdot d_3^3}{L_3} \sqrt{\frac{T_1}{M}} = \frac{38,1 \cdot 0,4^3}{1} \sqrt{\frac{293}{29}} = 7,751 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (73)$$

Используем ЛА-400. Диаметр условного прохода  $d_y = 0,4 \text{ м}$ .

Проводимость в молекулярном режиме течения газа  $U_{34} = 23,5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Длина пятого элемента –  $L_5 = 0,5 \text{ м}$ , диаметр –  $d_5 = 0,4 \text{ м}$ . Проводимость третьего трубопровода:

$$U_{35} = 38,1 \cdot \frac{d_5^3}{L_5} \cdot \sqrt{\frac{T_1}{M}} = 38,1 \cdot \frac{0,4^3}{0,5} \cdot \sqrt{\frac{293}{29}} = 15,501 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (74)$$

Используем ЗВЭ-400. Диаметр условного прохода  $d_y = 0,4 \text{ м}$ .

Проводимость в молекулярном режиме течения газа  $U_{36} = 46,25 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Длина седьмого элемента –  $L_7 = 1 \text{ м}$ , диаметр –  $d_7 = 0,4 \text{ м}$ . Проводимость второго трубопровода:

$$U_{37} = \frac{38,1 \cdot d_3^3}{L_3} \sqrt{\frac{T_1}{M}} = \frac{38,1 \cdot 0,4^3}{1} \sqrt{\frac{293}{29}} = 7,751 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (75)$$

Суммарная проводимость участка:

$$U_3 = \frac{1}{\frac{1}{U_{31}} + \frac{1}{U_{32}} + \frac{1}{U_{33}} + \frac{1}{U_{34}} + \frac{1}{U_{35}} + \frac{1}{U_{36}} + \frac{1}{U_{37}}} = \frac{1}{\frac{1}{7,751} + \frac{1}{46,25} + \frac{1}{7,751} + \frac{1}{23,5} + \frac{1}{15,501} + \frac{1}{46,25} + \frac{1}{7,751}} = 4,232 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (76)$$

Проведем расчет распределение давления на участке вакуумной системы от золотниковых насосов до турбомолекулярных насосов и высоковакуумного коллектора.



Давление входного сечения насоса:

$$P_{н3} = p_{нр3} + \frac{Q}{S_{m3}} = 10^{-1} + \frac{0,014}{1,84} = 0,108 \text{ Па.} \quad (77)$$

Перепад давления по длине трубопровода элемента 7:

$$\Delta p_7 = \frac{Q}{U_{37}} = \frac{0,014}{7,751} = 6,117 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (78)$$

Перепад давления в ЗВЭ-400:

$$\Delta p_6 = \frac{Q}{U_{36}} = \frac{0,014}{46,25} = 3,076 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (79)$$

Перепад давления в трубопроводе элемента 5:

$$\Delta p_5 = \frac{Q}{U_{35}} = \frac{0,014}{15,501} = 3,059 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (80)$$

Перепад давления в ЛА-400:

$$\Delta p_4 = \frac{Q}{U_{34}} = \frac{0,014}{23,5} = 6,053 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (81)$$

Перепад давления в трубопроводе элемента 3:

$$\Delta p_3 = \frac{Q}{U_{33}} = \frac{0,014}{7,751} = 6,117 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (82)$$

Перепад давления в ЗВЭ-400:

$$\Delta p_2 = \frac{Q}{U_{32}} = \frac{0,014}{46,25} = 3,076 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (83)$$

Перепад давления в трубопроводе элемента 1:

$$\Delta p_1 = \frac{Q}{U_{37}} = \frac{0,014}{7,751} = 6,117 \cdot 10^{-4} \text{ Па.} \quad (84)$$

## 3 ОПИСАНИЕ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ

### 3.1 Общая структура установки

Из основных составных частей данной вакуумной установки можно выделить вертикальную вакуумную камеру, три системы вакуумирования, три системы газоснабжения, систему разгерметизации вакуумной камеры и систему управления, измерения и контроля системами.

Объект испытаний помещается в вакуумную камеру горизонтальным или вертикальным способом.

В камере создается рабочее давление с помощью системы из форвакуумных, высоковакуумных и сверхвысоковакуумных насосов. Форвакуумная система производит предварительную откачку камеры до давления  $10^{-1}$  Па . Это необходимо для дальнейшей корректной работы турбомолекулярных насосов. Форвакуумная система из пяти золотниковых насосов НВЗ-500. После того, как был получен предварительный вакуум, камера откачивается высоковакуумной системой, состоящей из четырех турбомолекулярных насосов Shimadzu FT-6300 WH. Сверхвысоковакуумная система создает предельное давление  $1 \cdot 10^{-8}$  Па . Система состоит из трех криогенных насосов HSR VELCO 801.

Система зарядки сжатыми газами заполняет камеру гелием, азотом и воздухом.

Система СУИК, которая предназначена для управления, измерения и контроля регулирует работу систем вакуумирования, газоснабжения и разгерметизации. Управление производится дистанционно. Также СУИК подает сигнал и производит необходимые блокировки при возникновении аварийных ситуаций и сбоев в работе.

### 3.2 Вакуумная камера

Корпус вакуумной камеры состоит из вертикально расположенной цилиндрической обечайки, эллиптических верхнего и нижнего днищ, фланца и

уплотнения верхнего днища, опорных лап. Обечайка и эллиптические днища из стали 08X18H10T.

Цилиндрическая часть камеры, диаметром 20 м и толщиной 70 мм, с наружной стороны подкреплена четырьмя П-образными кольцами жесткости. Кольца жесткости выполнены из стали 08X18H10T, высотой 200 мм, ширина приварного участка 500 мм.

По бокам цилиндрической обечайки расположено два штуцера. Первый, длиной 8 м и диаметром 10 м, закрывается эллиптической крышкой и крепится болтами. Штуцер предназначен для горизонтальной загрузки объекта испытания. Второй штуцер, длиной 2,5 м и диаметром 3 м, закрывается конической полой крышкой, крепятся на болты. В процессе работы данный штуцер используется в качестве шлюза для работы технического персонала.

Четыре штуцера, два диаметром 1 м и два диаметром 200 мм, расположены с боковых сторон цилиндрической обечайки.

В камере установлены два эллиптических днища – верхнее и нижнее. Каждое днище имеет следующие размеры: высота – 5 м, диаметр – 20 м, толщина – 70 мм.

К верхнему эллиптическому днищу приварен фланец. Кольцо приварено к нижнему опорному фланцу снизу, которое имеет проточку. В проточке имеется резиновый уплотнитель для большей герметичности камеры. Фланцы соединяются болтами.

Нижнее эллиптическое днище приваривается к нижней части обечайки, а также с внешней стороны днища устанавливаются четыре опоры. Размеры опор составляют: диаметр окружности – 2,5 м, высота – 3 м.

Внутри камеры находится поворотная платформа и кольца жесткости для повышения прочности конструкции. Платформа вместе с объектом испытаний вращается относительно вертикальной оси камеры за счет электропривода.

При подготовке к испытаниям объект испытаний устанавливается на телегу, которую закатывают по направляющим внутрь камеры при фронтальной загрузке или опускается при вертикальной загрузке. Объект

фиксируется, но имеет возможность вращаться относительно горизонтальной оси (Рисунок 15).

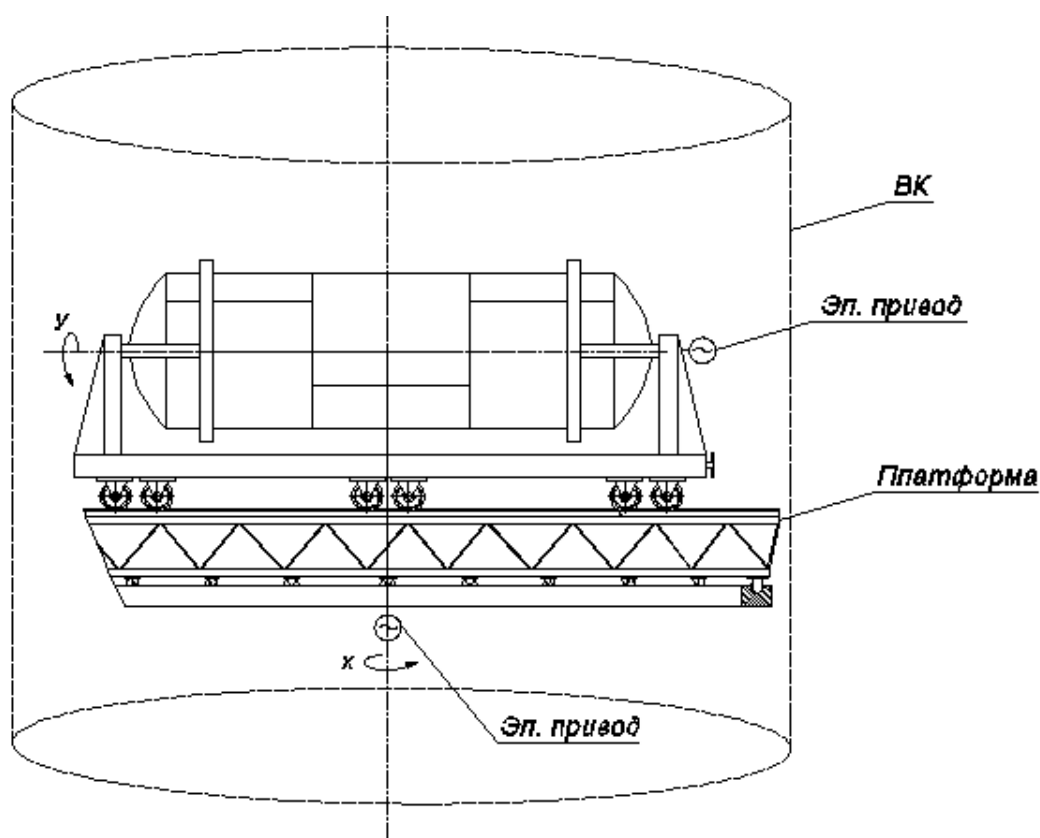


Рисунок 15 – Объект испытания на тележке и поворотной платформе

Криопанели, установленные в камере, обеспечивают высокую быстроту откачки остаточного газа и состав газа, который близок к среде в космосе. Для охлаждения криопенелей внутри них протекает жидкий азот с температурой  $T \approx 77 K$ .

В качестве системы имитации солнечного излучения внутри камеры установлено сто керамических инфракрасных нагревателей. Эти нагреватели предназначены для имитации различных излучений космического пространства. Мощность нагревателей – 1000 Вт, максимальная температура –  $2520^{\circ}C$ , максимальная температура нагреваемой области –  $700^{\circ}C$ . Все лампы имеют стандартные цоколи, поэтому они удобны в эксплуатации, а также легко взаимозаменяемы.

Данный тип нагревателей передает энергию электромагнитными волнами, и так как это не требует излучения окружающей среды, эта передача возможна для работы в условиях вакуумной среды.

Внутри камеры установлен отражатель для лучшего воздействия излучения на поверхности объекта испытаний.

### **3.3 Системы откачки**

Откачка камеры осуществляется несколькими системами. Система форвакуумной откачки состоит из пяти золотниковых насосов. Эта система работает в цепи с высоковакуумной системой. Система высоковакуумной откачки состоит из четырех турбомолекулярных насосов. Золотниковые насосы создают необходимое давление для работы турбомолекулярных. Система сверхвысоковакуумной откачки состоит из трех криогенных насосов.

#### **3.3.1 Золотниковый насос**

Вакуумный золотниковый насос – это специализированное оборудование, которое необходимо для того, чтобы создавать определенный уровень вакуума в замкнутой среде. Его широко применяют в процессе откачки незагрязненных паров и газов или тех сред, в которых содержится небольшое количество паров конденсата. Данный тип оборудования нашел применение в различных областях, обладает довольно простым устройством и долгим эксплуатационным периодом.

Золотниковый двухкамерный насос типа НВЗ-500.

Во время вращения эксцентрика золотник сжимает находящийся в роторной камере газ. Далее газ выходит в атмосферу через выпускные клапаны. Чтобы предотвратить конденсацию паров воды в камеру сжатия подается атмосферный воздух (балластный газ).

Основными элементами НВЗ-500 являются насос, двигатель, клиноременная передача и маслобак. На рисунке 16 видно, что в корпусе насоса сделаны роторные камеры, масляная камера, каналы необходимые для подвода и отвода рабочей среды.

Технические характеристики насоса НВЗ-500:

Быстрота откачки –  $S = 0,56 \text{ м}^3/\text{с}$  ;

Предельное остаточное давление –  $P_{ост} = 10^{-2} \text{ Па}$  ;

Мощность двигателя –  $N_{дв} = 55 \text{ кВт}$  ;

Масса насоса –  $M = 4000 \text{ кг}$  ;

На рисунке (17) изображена зависимость быстроты действия насосов от входного давления.

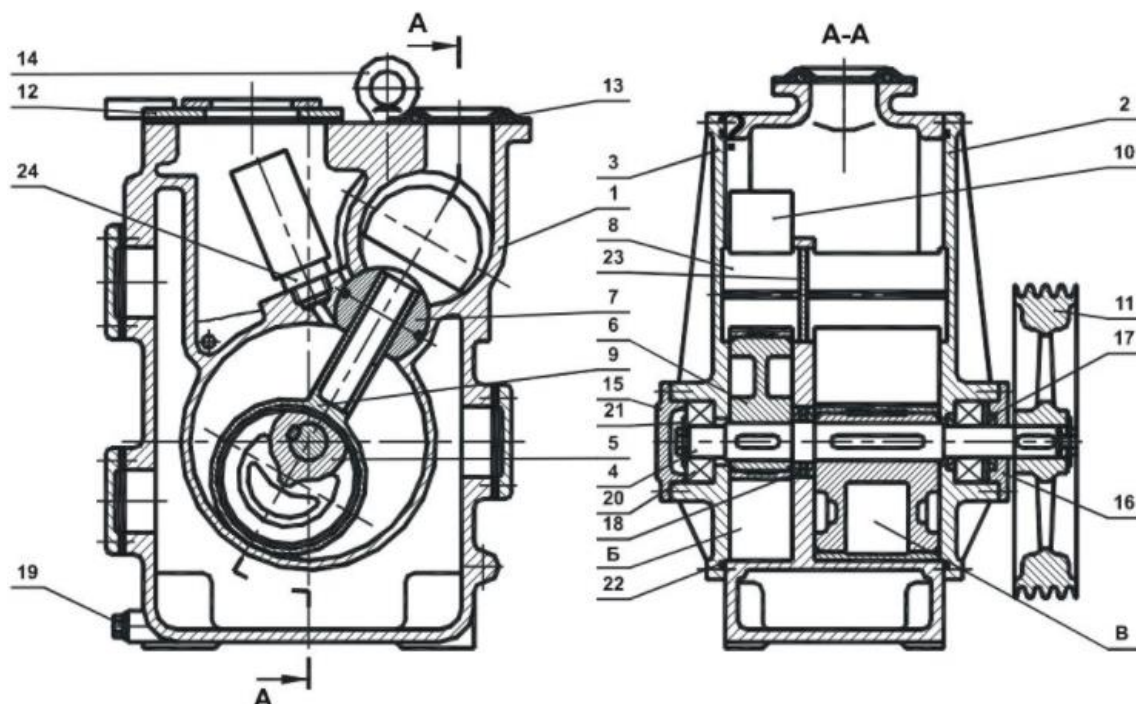


Рисунок 16 – Схема золотникового насоса: 1–корпус; 2–крышка передняя; 3–крышка задняя; 4–вал; 5–эксцентрик передний; 6–эксцентрик задний; 7–направляющая передняя; 8–направляющая задняя; 9–плунжер передний; 10–плунжер задний; 11–маховик; 12–крышка; 13–кольцо; 14–рым-болт; 15–крышка; 16–крышка; 17–манжета; 18–манжета; 19–пробка; 20–подшипник; 21–шайба; 22–кольцо; 23–перегородка; 24–клапан Б и В роторные камеры.

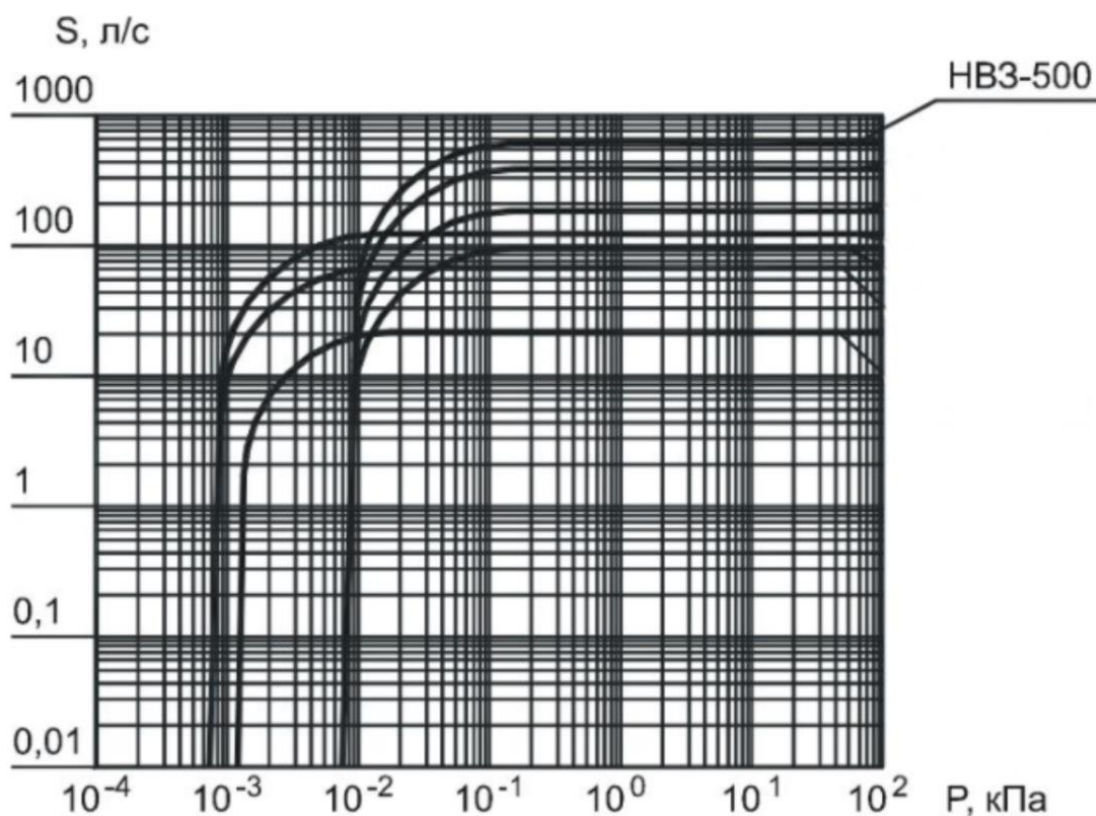


Рисунок 17 – Зависимость быстроты действия насосов от входного давления

### 3.3.2 Турбомолекулярный насос

В турбомолекулярных насосах происходит раскручивание ротора до сверхзвуковой скорости внешним электрическим нагревателем. Со стороны физического обоснования процесса можно сказать, что внешняя энергия затрачивается на изменение внутренней энергии газа через его сжатие.

В качестве ротора турбомолекулярного насоса используются подвижные лопатки, а в качестве статора – неподвижные. Лопатки ротора и статора располагаются слоями поочередно, а также изменяются направления углов лопаток (Рисунок 18).



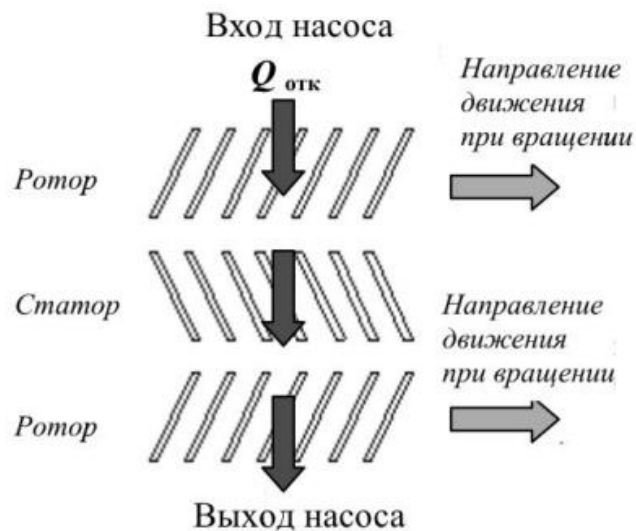


Рисунок 18 – Схема взаимного движения лопаток-пропеллеров

Цель работы турбомолекулярных насосов – обеспечение рабочего давления в вакуумной камере до  $10^{-6}$  Па. Максимальная скорость вращения ротора может достигать 100 000 об/мин при различных диаметрах роторов. Турбомолекулярные применяются для работы в условиях молекулярного режима течения газа.

Чтобы обеспечить сверхзвуковые линейные скорости лопаток необходимо наличие предварительного вакуума, также это необходимо для обеспечения свободного движения молекул газа,

В качестве турбомолекулярных насосов используются насосы Shimadzu FT-6300 WH. Основные преимущества этих насосов: плавная регулировка производительности (от 25% до 100%); установка насоса в произвольном положении и под любым углом; быстрый запуск 3-18 мин; контроллер, снабженный функциями быстрой диагностики проблем и функций состояния.



Рисунок 19 – Турбомолекулярный насосы Shimadzu FT-6300 WH

Технические характеристики насоса Shimadzu FT-6300 WH:

Быстрота откачки –  $S = 6,3 \text{ м}^3/\text{с}$ ;

Предельное остаточное давление –  $P_{\text{ост}} = 10^{-8} \text{ Па}$ ;

Максимальное давление на выходе –  $P_{\text{вых}} = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ ;

Диаметр входного патрубка –  $D = 625 \text{ мм}$ ;

Диаметр выходного патрубка –  $d = 410 \text{ мм}$ ;

Масса насоса –  $M = 205 \text{ кг}$ .

### 3.3.3 Криогенный насос

Криогенные вакуумные насосы применяются для получения глубокого и чистого (безмасляного) вакуума. Такие насосы обладают большой скоростью откачки. Новейшие модели криогенных насосов могут включать в себя двухступенчатые криоголовки. Для охлаждения криоголовок до необходимой криогенной температуры в качестве хладагента может использоваться газообразный гелий. Температура первой ступени криоголовки может составлять от  $-190^\circ\text{C}$  до  $-200^\circ\text{C}$ , а температура второй ступени от  $-250^\circ\text{C}$  до  $-260^\circ\text{C}$ . Чтобы сократить затраты на газообразный гелий, система газоснабжения замкнута.

Чтобы полностью автоматизировать и процесс регенерации необходимо включить в систему специальных контроллеров. Это также позволяет создавать

автоматическое переключение между работающими и регенерируемыми насосами во время откачки.

На рисунке (20) представлен разрез криогенного насоса.

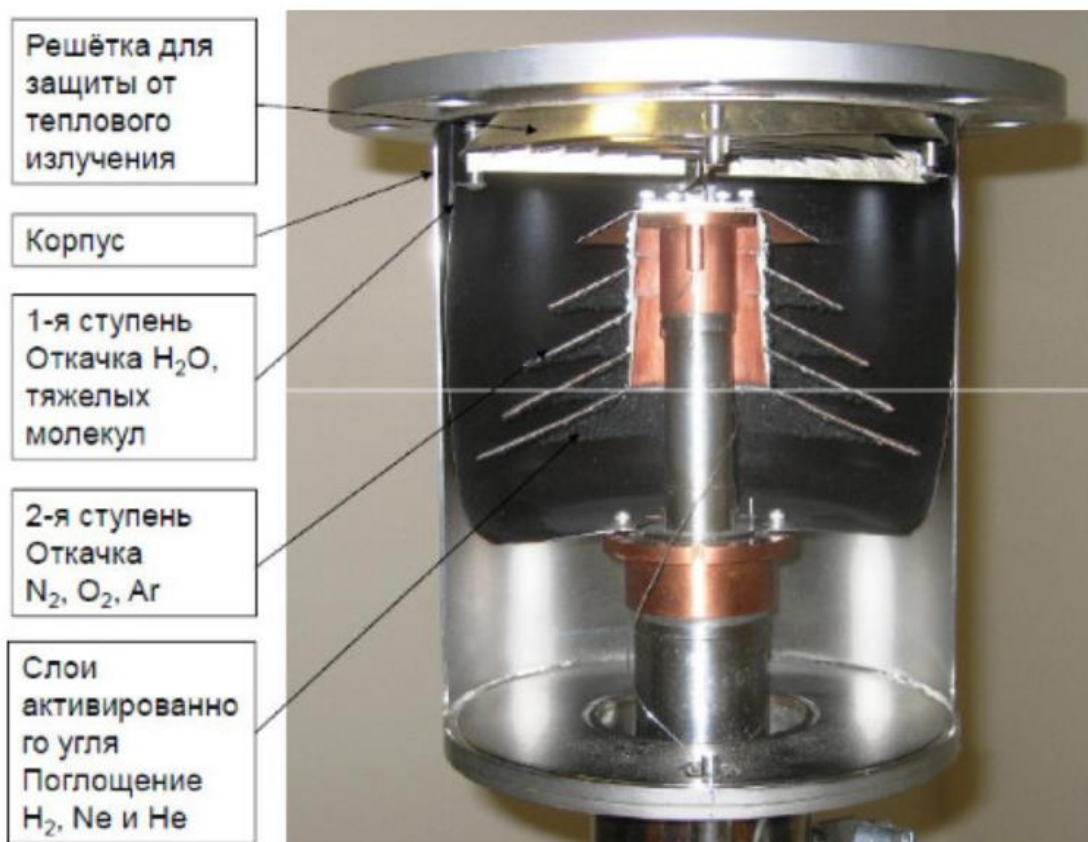


Рисунок 20 – Разрез криогенного насоса

В качестве турбомолекулярных насосов используются насосы HSR VELCO 801. Конструкция насоса делает возможной работу в экстремальных условиях, то есть как при резком подъеме давления, так и при температурах до  $350^{\circ} C$ . Геометрия насоса обеспечивает чрезвычайно долгий период эксплуатации и короткие циклы регенерации. Большая хладопроизводительная мощность поддерживается в течение длительного периода использования без необходимости технического обслуживания.



Рисунок 21 – Криогенный насос HSR VELCO 801

Технические характеристики насоса HSR VELCO 801:

Быстрота действия –  $S = 28 \text{ м}^3/\text{с}$ ;

Диаметр входного патрубка –  $D = 800 \text{ мм}$ ;

Время захолаживания –  $t = 180 \text{ мин}$ ;

Масса насоса –  $M = 300 \text{ кг}$ .

### **3.4 Вакуумная азотная ловушка**

Одной из разновидностей конденсационных низкотемпературных вакуумных ловушек являются азотные ловушки.

Вакуумная азотная ловушка – это устройство, основной задачей которого является предотвращение проникновения паров рабочих жидкостей вакуумных насосов в откачиваемый объем.

Ловушки, принадлежащие этому типу способны захватывать пары и газы из объема вакуумной камеры и за счет этого снижать давление в камере.

Чтобы обеспечить максимально полную защиту откачиваемого объема, происходит понижение давления паров рабочих жидкостей до значений температуры, которые соответствуют температуре охлажденных элементов ловушки.

Применение низкотемпературных ловушек позволяет получать в хорошо обезгаженной системе остаточное давление  $10^{-8} - 10^{-10} \text{ Па}$ . Для охлаждения могут применять жидкий азот.

На рисунке 22 показана конструкция широко распространенной цельнометаллической жалюзийной ловушки, которая работает за счет использования жидкого азота.

Азотные ловушки позволяют защитить объем от тяжелых углеводородов, обеспечивая высокую степень защиты более  $10^6$ .

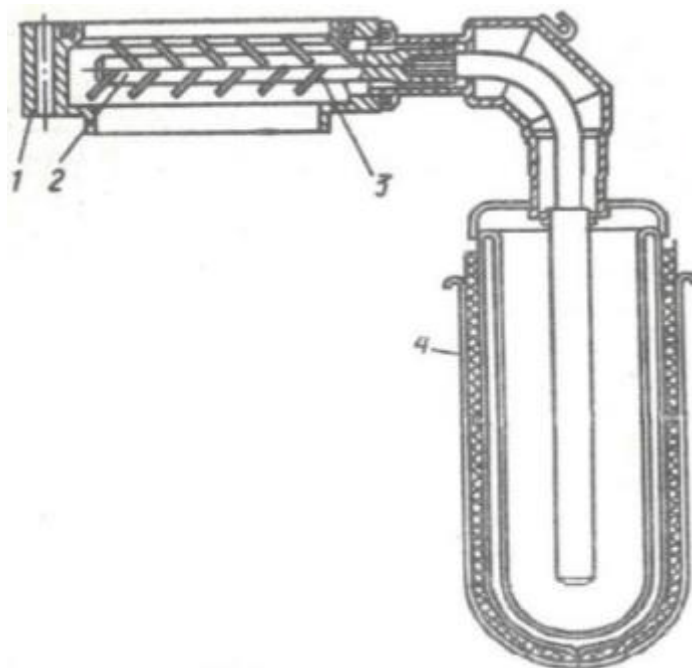


Рисунок 22 – Металлическая жалюзийная азотная ловушка: 1–корпус; 2–хладопровод; 3–защитные элементы; 4–сосуд Дьюара.

В системе форвакуумной откачки используются азотные ловушки типа ЛА-400. Использование азотной ловушки перед форвакуумными масляными золотниковыми насосами дает возможность получить давление  $10^{-1}$  Па.

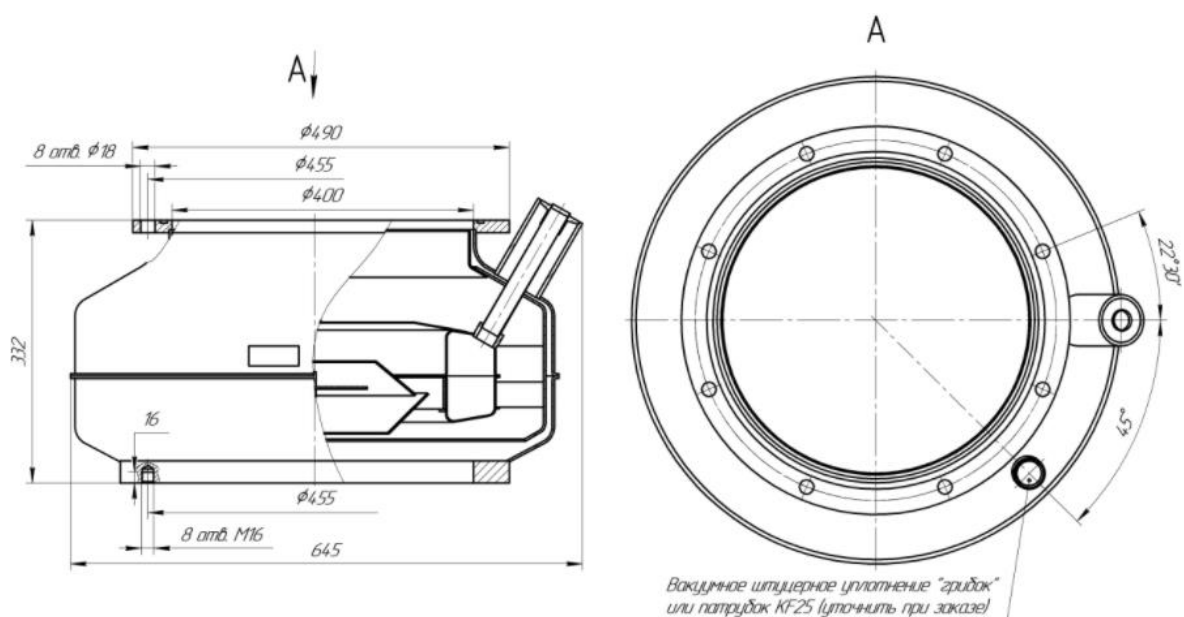


Рисунок 23 – Габаритные размеры азотной ловушки ЛА-400

Технические характеристики азотной ловушки ЛА-400:

Максимальная проводимость –  $S = 5,9 \text{ м}^3/\text{с}$ ;

Диаметр входного патрубка –  $D = 400 \text{ мм}$ ;

Количество жидкого азота –  $V = 7,5 \text{ л}$ ;

Масса –  $M = 50 \text{ кг}$ .

### 3.5 Вакуумные трубопроводы

Вакуумные трубопроводы соединяют различные элементы систем и системы между собой. Они являются одной из основных частей вакуумной установки.

Для быстроты откачки необходимо обеспечить максимальную проводимость вакуумного трубопровода. С этой целью диаметры трубопроводов пытаются сделать как можно больше, а длину как можно меньше. Поэтому в большинстве случаев диаметры трубопровода и входных отверстий насосов совпадают.

При выборе длины трубопровода необходимо учитывать положение элементов систем относительно друг друга, а также учитывать технические условия.

Во внутренней полости трубопроводов недопустимо наличие грязи, деформаций и коррозии. Стоит также учесть, что для обеспечения необходимого вакуума в трубопроводе также нужно откачивать газы с поверхности самого трубопровода и самого материала. При несоблюдении требований откачка вакуумной камеры может стать не только длительной, но и вообще невозможной.

При проведении работ по изготовлению, установке, испытанию и эксплуатации вакуумных систем в помещении должна быть хорошая система отчистки воздуха, вентиляция, а рабочие должны пройти соответствующую квалификацию, обучение и инструктаж.

Для того, чтобы сократить число возможных течей и, соответственно, уменьшить вероятность попадания воздуха в рабочий вакуум следует использовать цельные бесшовные трубопроводы и как можно больше сокращать количество разборных соединений, количество применений сварки или пайки.

При работе с средним, высоким и сверхвысоким вакуумом лучше применять фланцы, в которых используется уплотнения. При работе с низким вакуумом будет достаточно использовать фланцы с выступающей соединительной частью. Все прокладки должны быть из резины, которая предназначена для вакуумных работ. Это позволит обеспечить большую герметичность соединения.

### **3.5 Запорно-регулирующая вакуумная арматура**

Все элементы запорно-регулирующей вакуумной аппаратуры – совокупность оборудования вакуумных систем, которые используются для закрытия потока газов, контроля величины напускаемого газа, создания давления газов в камере. Данная аппаратура создает защиту вакуумной системы в случае возникновения аварийной разгерметизации или изменения давления.

При работе с установками с малым газоотделением применяют вакуумные краны, которые устанавливаются в линиях, предназначенных для предварительного разрежения, а также в ситуациях, когда большая

проводимость не требуется. Для того, чтобы обеспечить герметичность, необходимо использовать резиновые и фторопластовые уплотнители.

Если необходимо поставить затвор в систему трубопроводов с большим диаметром, то форма таких затворов преимущественно плоская. Такие затворы обладают следующими характеристиками:

- при различных требованиях технического задания герметичность, которая зависит от потока газа через места возможных течей, может составлять от  $10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$  до  $10^{-11} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ ;

- достаточно высокая проводимость клапана в открытом положении можно определить исходя из отношения потока газа к разности давлений во входном и выходном отверстиях клапана;

- быстрота действия;

- высокий ресурс, который зависит в основном от числа циклов перекрытия уплотнительной пары с обеспечением заданной герметичности.

Затвор вакуумный с электромеханическим приводом - это автоматизированная запорная арматура, управлять которой можно как дистанционно, так и с местного пульта управления, установленного непосредственно на самой запорной арматуре. Затворы с электроприводом отличает высокая надежность, герметичность, стойкость к коррозии, ремонтпригодность, невысокая стоимость.

В системе используются запорная вакуумная арматура ЗВЭ-1000, ЗВЭ-800, ЗВЭ-500 и ЗВЭ-400. На рисунке (24) представлены габаритные размеры ЗВЭ-400.



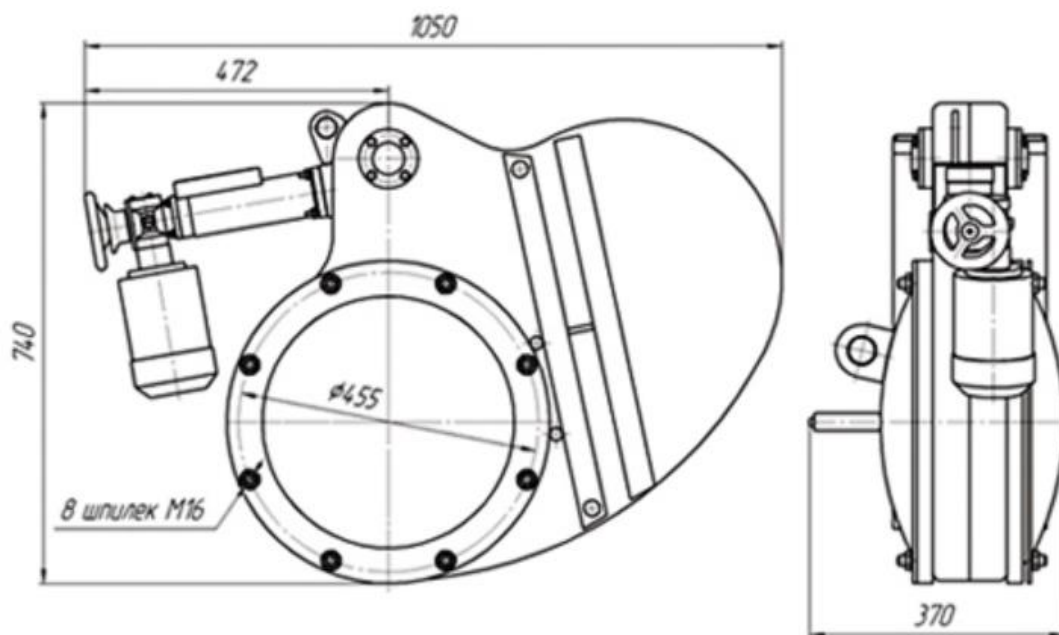


Рисунок 24 – Габаритные размеры ЗВЭ-400

### 3.6 Вакуумметры

При проведении работ с вакуумом необходимо проводить измерения давления с помощью манометров. Так как измерения проходят при давлении ниже атмосферного, манометры можно называть вакуумметрами. При давлении ниже  $10^{-3}$  Па с физической точки зрения прибор измеряют не давление газов на чувствительный элемент вакуумметра, а концентрацию молекул газа.

В вакуумной системе используются тепловые, деформационные, магнитные и ионизационные вакуумметры.

Вакуумметр тепловой ВТСО-1:

- диапазон рабочих давлений:  $10^{-1} - 10^4$  Па ;
- погрешность измерения: 10% ;
- габариты: 80×150×295 мм ;
- масса 1,8 кг .

Тепловых преобразователей имеют возможность измерять общее давление всех газов и паров, которые присутствуют в вакуумной системе. А также они способны обеспечивать непрерывность измерения давления.

Вакуумметр деформационный газоразрядный ВДГ-1:

- диапазон рабочих давлений:  $10^1 - 10^4$  Па ;

- погрешность измерения: 15%;
- габариты: 165×240×440 мм;
- масса 10 кг.

Преобразователь давления имеет две разделенные упругой мембраной камеры измеряемого давления и газоразрядную. Последняя заполнена инертным газом и в ней смонтирован механотронный датчик деформации мембраны. Разряд горит между двумя анодами и общим катодом, соединенным с мембраной. Прогиб мембранный при изменении давления приводит к перераспределению напряжений в обоих газоразрядных промежутках. Величиной, по которой определяют давление, является разность этих напряжений. Питание датчика и измерение разрядного сигнала обеспечивается измерительным блоком

Вакуумметр магнитный ВМБ-14:

- диапазон рабочих давлений:  $10^{-7} - 1$  Па;
- погрешность измерения: 50%;
- габариты: 467×80×158 мм;
- масса 4,2 кг.

Данная модель вакуумметра имеет простую конструкцию, в которой и отсутствует горячий катод. Благодаря этой схеме магнитные вакуумметры могут работать при любом давлении.

Вакуумметр ионизационный ВИ-14:

- диапазон рабочих давлений:  $10^{-8} - 10^1$  Па;
- погрешность измерения: 50%;
- габариты: 480×228×346 мм;
- масса 20 кг.

Достоинство ионизационного вакуумметра – строго линейная зависимость тока ионизации от давления.

### **3.7 Система разгерметизации**

Система разгерметизации необходима для напуска сухого сжатого воздуха в вакуумную камеру через шлюз.

Система разгерметизации соединяется с вакуумной камерой распределительным щитом. Данный щит имеет два входа от компрессорной станций высокого давления. Рядом с распределительным щитом находится пневматический щит, который подсоединяется к этим двум выводам.

В пневматическом щите предусмотрена возможность одновременного подключения одного или двух выводов газов. Чтобы понизить давление до  $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$  в пневматическом щите установлено два редуктора.

Чтобы обеспечить подачу воздуха из одного или двух редукторов одновременно выходы объединены в общий коллектор, который соединен с элементом для рассеивания потока, установленным внутри вакуумной камеры.

### **3.8 Система зарядки сжатыми газами**

Предназначение систем зарядки сжатыми газами – это насыщение изделия необходимыми газами. Это могут быть He, N, воздух и смесь He и N с воздухом.

Управление системой осуществляется с помощью пневмощитов. В пневмощите установлены ручные вентили и автоматические электропневмоклапаны для дистанционного управления. Манометры и датчики давления подключены к системе управления для обеспечения контроля входного и выходного давления.

### **3.9 Гелиевый течеискатель**

Для проведения проверок на герметичность мест возможных возникновений течей применяется гелиевый масс-спектрометрический течеискатель ТИ1-50. Данное устройство предназначено для испытаний различных систем и объектов, допускающих откачку внутренней полости. ТИ1-50 является универсальным устройством. ТИ1-50 Позволяет производить предварительную откачку, а также работать как в режиме прямого потока так и противотока с автоматическим выбором оптимального режима системой управления в зависимости от характеристик объекта испытаний.

Достоинства ТИ1-50:

- Самая высокая чувствительность в своём классе;
- Реализация всех возможных способов течеискания (например: способ щупа, вакуумной камеры, обдува, накопления и другие);
- Малые габариты и масса;
- Прост в обслуживании;
- Возможность калибровки по внешней течи;

Технические характеристики течеискателя ТИ1-50:

Чувствительность по гелию со щупом –  $5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$ ;

Время отклика со щупом – 5 с ;

Время выхода на рабочий режим – 5 мин ;

Габаритные размеры – 484×470×392 мм ;

Масса – 38 кг .



Рисунок 25 – Гелиевый масс-спектрометрический течеискатель ТИ1-50

### 3.10 Система рециркуляции азота

Данная система рециркуляции азота предназначена для обеспечения переработки жидкого азота, который уже был использован для охлаждения разных систем. Отработанный азот, который в процессе работы перешел в газообразное состояние, проходит через систему рециркуляции. Газообразный азот подвергается охлаждению и переходит опять в жидкое состояние. После этого жидкий азот возвращается в резервуар для хранения и может быть в дальнейшем использован для проведения испытаний.

## 4 ВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

### 4.1 Тепловакуумные испытания

Установленные внутри вакуумной камеры устройства тепловакуумных испытаний предназначены для исследования тепловых балансов объекта испытаний. На первом этапе проводится исследование распределения температур на тепловой модели объекта, которая совершенствуется до тех пор, пока результаты не станут удовлетворять требованиям технического задания. Измерения повторяются последовательно на прототипе. Конечные измерения проводятся с рабочим объектом при полном функционировании всех его систем и приборов. С помощью полученных данных о различных реакциях поверхности на температуру можно рассчитать значения температур для разных положений объекта относительно солнца. Эти испытания проводятся с помощью системы имитации солнечного излучения.

Чтобы получить условия испытаний максимально приближенные к условиям космоса нужно обеспечить имитацию освобождения молекул с поверхностей объекта, перемещения твердых веществ в областях с разным количеством вещества в вакууме при проведении проверок на трение различных узлов, механизмов и т.д. Чтобы получить данные условия необходимо создать высокий вакуум со значениями давления от  $10^{-6}$  Па до  $10^{-8}$  Па.

Чтобы проводить тепловакуумные испытания в вакуумных камерах размещаются имитаторы солнечной активности, излучения Земли и отражения от нее солнечного излучения, а также поверхности, охлаждаемые криогенными жидкостями для обеспечения поглощения космического пространства.

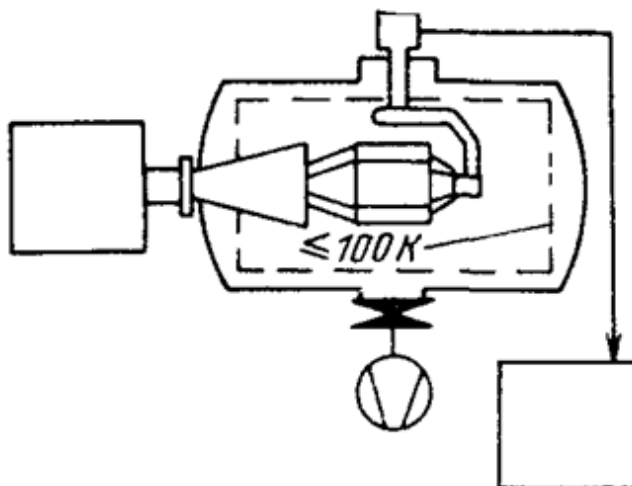


Рисунок 26 – Схема модулирующей установки для проведения тепло-вакуумных испытаний

#### 4.2 Вакуумно-температурные испытания

Цель вакуумно-температурных испытаний заключается в исследовании объекта в условиях экстремально низкого давления и экстремальных значений температуры. Данные значения температур определяются исходя из результатов тепловакуумных испытаний рабочего объекта. Вакуумно-температурные испытания позволяют находить элементы, которые могут отказать с большей вероятностью, чем другие.

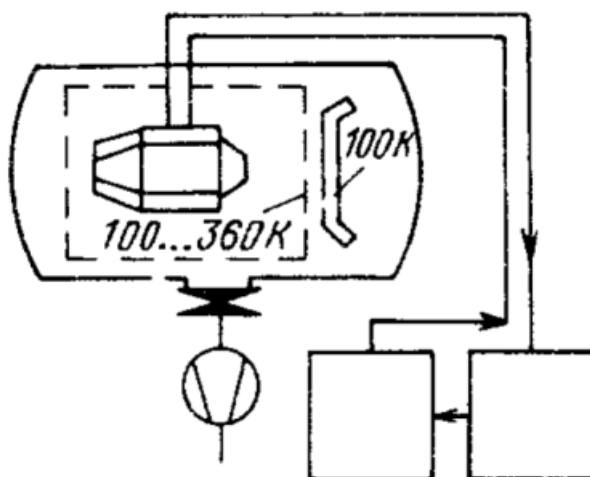


Рисунок 27 – Схема модулирующей установки для проведения вакуумно-температурных испытаний

## 5 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Начало работы с вакуумной установкой происходит с первоначального состояния, при котором отключена подача электроэнергии систем, а также;

- вакуумные затворы, вентили, клапаны закрыты кроме вентилях натекателей;

- системы управления выключены;

- в вакуумной камере атмосферное давление;

- крышка отсоединена и отведена в сторону.

Далее проводятся операции по подготовке к испытаниям:

- обеспечение готовности систем сжатых газов;

- подготовка и заправка криогенных компонентов;

- система электроснабжения (СЭС) подает напряжение;

- проверка системы гарантированного электрического питания (СГЭП) и

проверка дизельных генераторов на холостом ходу.

Во время загрузки объекта испытаний (ОИ) крышка (боковое днище) фронтального устройства загрузки отжимается и с помощью крановой системы отводится в сторону. ОИ устанавливается и закрепляется на специальной телеге. Телега с ОИ по направляющим закатывается внутрь вакуумной камеры (ВК). Проверяется качество всех стыков и всех разъемов ВК. Стыковка коммуникаций газоснабжения производится при необходимости. После всех операций крышка возвращается и закрывается. После закрытия крышки производится проверка плотности прилегания крышки к обечайке, а также проверяется усилие сжимающее уплотнитель

Чтобы проверить герметичность прилегания крышки включается один из пяти форвакуумных насосов (NL5). Ручные вентили, установленные на преобразователях, открываются; деформационный манометрический преобразователь (PD6), который установлен перед насосом, измеряет давление. В случае, когда давление падает, Необходимо открыть вакуумные затворы (VP02, VP21) байпасных линий, а также вакуумный затвор (VP09). Азотные



ловушки (BL02...BL05) начинают захолаживаться. Происходит откачка ВК. Проверка ВК на герметичность проходит с помощью метода обдува гелиевым течеискателем. Гелиевый масс-спектрометрический течеискатель подключается к камере системы откачки. В камеру подается гелий. Если крышка закрыта не плотно, то гелий начнет просачиваться в объем камеры. В этом случае необходимо повторно тщательно закрыть крышку.

Процесс вакуумирования происходит следующим образом:

Когда вентили для натекания (VF01-VF10) закрываются, начинают свою работу все золотниковые насосы (NL2...NL4).

Три вакуумных затвора (VP15, VP17, VP19) необходимо открыть. С закрытием клапанов для напуска открываются вакуумные затворы (VP14, VP16, VP18). Запускается откачка вакуумной камеры форвакуумной системой. Через манометры (PT01, PT02) необходимо контролировать давление в вакуумной камере. Когда давление опускается до  $1 \cdot 10^0$  Па открываются вакуумные затворы (VP08...VP11), а все линии для золотниковых насосов закрываются. Процесс откачки высоковакуумного коллектора вместе с вакуумной камерой происходит до давления  $1 \cdot 10^{-1}$  Па, что соответствует значению форвакуума.

В тот момент, когда давление в вакуумной камере на манометрах (PT01, PT02) составляет  $1 \cdot 10^{-1}$  Па, начинают свою работу турбомолекулярные насосы (NR2...NR4). Вакуумный затвор (VP09) закрывается, а вакуумные затворы (VP04...VP06) необходимо открыть. Откачка камеры системами форвакуумной и высоковакуумной откачки длится до достижения рабочего давления  $1 \cdot 10^{-6}$  Па. Давления определяется манометром (PA0.1).

Когда давление достигает значения  $1 \cdot 10^{-6}$  Па, начинают работу криогенные насосы, при этом механические насосы выключаются.

Криогенные насосы захолаживаются до температуры около  $-195^\circ\text{C}$ . Вакуумный затвор (VP01) закрывается. Вакуумные затворы (VP22...VP24) открываются. А также открываются клапаны подачи жидкого азота. Вакуумные затворы (VP04...VP06) закрываются. Криогенные насосы начинают работу.

Криопанели захлаживаются жидким азотом. Золотниковые и турбомолекулярные насосы систем откачки выключаются. С помощью напуска воздуха через натекагель (VF10) происходит изменение давления в коллекторе. Когда давление в коллекторе станет равным атмосферному, вакуумные затворы (VP08...VP20) закрываются.

Криогенные насосы поддерживают образовавшийся высокий вакуум в камере  $P \leq 1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$ .

После вышеперечисленных операций ВК считается откаченной. Далее можно начинать вакуумные испытания.

Контроль давления осуществляется через манометрический преобразователь (РА0.1).

Криопанели, которые находятся внутри ВК схожи по функционалу с криогенными насосами. Пары и газы конденсируются на поверхности криопанелей. Это работает с парами и газами, у которых критическая температура выше, чем температура жидкого азота, протекающего в криопанелях.

Одной из дополнительных функций криопанелей является возможность охлаждать ОИ до отрицательных температур.

Циклограмма тепловакуумных испытаний запускается, когда системы откачки завершили свою работу.

Циклограмма лунных комплексов имеет заданные массово-энергетические параметры и объемно-геометрическое содержание объекта в условиях космического пространства

ОИ при необходимости может наполняться через подсоединенную систему зарядки сжатыми газами. Это необходимо для проверок на герметичность ОИ. При наличии течей и неплотных соединений из полости ОИ газы из-за разности давлений будут натекачь в пространство вакуумной камеры. Определение наличия течей производится через контрольно-измерительное оборудование.

Поиск неисправностей ОИ производится согласно утвержденной технической документации.

Во время испытаний не обходимо соблюдать требования инструкции по эксплуатации и монтажу, требования чертежей, требования технических условий, а также требования описаний на оборудование.

Перед началом испытаний все необходимые материалы, приборы измерения и контроля, испытательные схемы, оборудование для проведения испытаний на прочность и герметичность обязательно должны быть подготовлены и проверены на соответствие технической документации и различным нормам.

В помещениях, в которых находятся все системы вакуумной установки, температура воздуха должна быть не ниже  $5^{\circ}\text{C}$ .

Персонал должен изучить устройство систем, инструкции эксплуатации, технические требования чертежей, а также правила техники безопасности. Все должны быть аттестованы и иметь соответствующие удостоверения.

Ко всем сжатым газам должны применяться требования ГОСТ, ОСТ, ТУ для испытаний вакуумных систем.

Соблюдение инструкции и правил техники безопасности является обязательным.

Испытания требуют дистанционного метода работы.

Персонал, который проводит испытания, должен находиться в безопасном месте. Арматура и другие элементы, через которые производится изменение давления, а также ее управление, ее положения, манометры и вакуумметры также должны размещаться в безопасном месте. Безопасные зоны должны быть утверждены проектом производства работ или технологией монтажа. Зона испытаний должна быть ограждена и должны быть вывешены объявления с предупреждением о проведении испытаний.

Давление в самом объекте испытаний должно изменяться аккуратно и поэтапно.

Испытание должно остановиться, если во время работы появляются неисправности:

- при изменении давления в испытываемом объекте появляются звуки деформации;
- в установившемся вакууме происходит изменения давления;
- появляются дефекты в элементах вакуумной системы.

В случае возникновения аварийных ситуаций насосы выключаются по сигналу манометра (PM0.1, PM1.1, PM2.1), закрываются вентили на измерительные коллекторы и коллекторы откачки. Открываются вентили натекания (VF1, VF2).

## 6 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

### 6.1 Общие сведения о безопасности работы с вакуумной установкой

Данная глава составлена для обеспечения безопасности персонала при проведении работ с вакуумной установкой, а также поиск и установление неисправностей составных частей установки.

Процесс проведения испытаний в вакууме является сложным и опасным. Во-первых, часто необходимо работать с сосудами под давлением. Во-вторых, для некоторых систем нужны сжатые газы, такие как гелий, жидкий азот и т.д. В-третьих, обязательная работа с различным электрооборудованием. В-четвертых, так как вакуумная установка имеет большие габариты, то часть работы может осуществляться на высоте.

При работе с вакуумной установкой необходимо проводить выдачу наряда или распоряжение о проведении работы. Персонал должен получить разрешение на проведение работ самостоятельно.

Для корректной работы руководитель обязан проводить инструктаж перед началом работы и выдать персоналу разрешения на работу.

Обязательно необходимо проводить рабочие перерывы и объявлять об окончании рабочего дня.

Любое рабочее пространство необходимо ограждать и определять четкие границы.

После завершения работ необходимо проводить проверки всех трубопроводах, коллекторах и других элементов вакуумной системы на наличие вакуума или излишнего давления.

Необходимо проверять состояние электрооборудования, а также наличие случаев сбоя и некорректной работы оборудования.

#### 6.1.1 Безопасность труда

Для допуска к работе с вакуумной станции допускается только персонал, который прошел проверку по знанию установки, по принципам работы и действия всех систем вакуумной установки. Должно проверяться знание правил

безопасности и правил эксплуатации. Помимо прочего персоналу также необходимо пройти медицинский осмотр и подготовку по оказанию первой помощи.

Все проверки проводятся специальной комиссией предприятия, которое производит эксплуатацию. После проведения проверки предприятие выдает документ подтверждающий компетентность персонала. При этом персонал должен периодически проходить проверку знаний. Проверки могут проводиться также после длительного перерыва в работе. Без всех пройденных проверок персонал не должен допускаться к работе.

В начале рабочего дня ответственные лица должны проводить инструктаж персонала. Ответственные лица и персонал отмечаются в соответствующем журнале безопасности.

При работе с вакуумной установкой строго запрещено закрывать, затеснять пространство между рабочими местами, проходи и другие пути.

Все посторонние вещи, которые не используются в работе запрещено хранить в шкафах, в помещениях предназначенных только для рабочего оборудования. Запрещено также использовать посторонние вещи, инструменты и оборудование вместо утвержденных предприятием.

Работа должна производиться при хорошем освещении.

Во время работы запрещается отходить от своего рабочего места, если система находится в рабочем состоянии.

Запрещено трясти и бросать манометры. А также применять их в работе, если они не были проверены или имеют различные дефекты и повреждения. Манометры необходимо периодически проверять в рамках проведения технического обслуживания.

При работе с трубопроводами запрещено садиться, вставать, опираться на них, а также ставить различные предметы. При необходимости разбора трубопроводов и их элементов, сначала надо убедиться, что внутри их полости нет вакуума или излишнего давления.

Запрещено производить уборку работающего оборудования или оборудования под напряжением. Если при уборке в качестве чистящего средства используются спирт или бензин, то необходимо использовать средства защиты дыхательных путей, а помещение должно быть хорошо проветриваемым.

Рабочая одежда персонала не может состоять из синтетики, чтобы не допускать возникновения статического электричества на одежде персонала. Все защитные средства должны находиться в пригодном для использования состоянии.

#### 6.1.2 Основные правила безопасности при работе с гелиевым масс-спектрометрическим течеискателем

Персонал, который производит работу с гелиевым масс-спектрометрическим течеискателем ТИ1-50 должен проходить проверку на знание оборудования и его принципов работы. Персонал должен получить допуск от комиссии предприятия на работу с данным оборудованием.

Когда оборудование находится в процессе работы или под напряжением, запрещено проводить различные настройки, если они требуют вскрытия корпуса оборудования. Необходимо тщательно соблюдать правила работы с электрооборудованием.

Все необходимые проверки состояния, замены проводов, ремонт электрической составляющей прибора должны проводить сотрудники электротехнического отдела. Все проводимые операции должны заноситься в специальный паспорт данного оборудования с подробным описанием. Если данный течеискатель не прошел проверку и не соответствует работоспособному состоянию, то работа с ним строго запрещена.

Течеискатель внутри корпуса имеет несколько кнопок для замыкания напряжения. Во время проведения настроек строго запрещено использовать данные кнопки

Если во время проведения работ с течеискателем будет найдена течь, неплотность и т.п. запрещается проводить работы по ее устранению при давлении или вакууме внутри проверяемого участка.

## **6.2 Правила безопасности при проведении работ со сжатыми газами**

Чтобы иметь допуск к работе с системами сжатых газов персонал должен пройти проверку комиссии предприятия и получить соответствующий документ, подтверждающий их допуск. А также персонал должен изучить меры безопасности работы со сжатыми газами.

При работе со сжатыми газами может проводиться продув систем трубопроводов. Во время проведения данных работ персонал не должен находиться вблизи выходных отверстий.

Все трубопроводы должны соответствовать их рабочему состоянию. Не допускаются дефекты, прогибы, наличие коррозии и загрязнений, трещины и другие деформации.

А каждого элемента трубопроводов и запорно-регулирующей арматуры есть свой ресурс. Недопустимо использовать в работе элементы с исчерпанным ресурсом.

Если система трубопроводов имеет какую-либо деформацию или неисправность, запрещается ее устранение, пока внутри поддерживается излишнее давление.

Недопустимо превышения давления выше заданного рабочего значения. Также запрещено производить выпуск сжатого газа без манометрических измерений. Манометры должны проходить периодическую проверку, а использование манометров с дефектами или в неисправном состоянии запрещено.

Емкости, предназначенные для хранения сжатых газов и находящиеся под давлением должны иметь обозначения различных цветов, которым соответствует каждый вид газа. На трубопроводах также должны быть цветовые отметки и указатели направления потока газа.



Запрещается использовать емкости, которые имеют какие-либо дефекты, не прошли проверку, у которых истек ресурс.

В данной вакуумной системе используются такие газы как азот и гелий. Персонал должен знать все правила безопасной работы с этими газами. При утечке в помещении данных газов людям, которые находятся внутри этого помещения, может не хватать кислорода. Это представляет серьезную опасность для жизни.

В случае возникновения чрезвычайной ситуации необходимо вынести пострадавших людей с места утечки. Как можно скорее освободить человека от одежды, которая может препятствовать свободному дыханию. Аккуратными движениями дать понюхать нашатырный спирт. Вызвать скорую помощь. Если пострадавший не дышит, то необходимо сделать искусственное дыхание в соответствии с правилами оказания первой помощи.

### **6.3 Правила безопасности при проведении работ с жидким азотом**

В вакуумной камере и в системах откачки используется жидкий азот. Необходимо использовать только качественный азот, соответствующий всем нормам стандартов.

Для хранения и перевозки жидкого азота используются сосуды Дьюара. Также могут применяться специальные контейнеры. Персонал должен пройти проверку и быть допущен к работе с жидким азотом и сосудами Дьюара.

Строго запрещается использовать сосуды Дьюара при неисправном состоянии. Если сосуд подвергся деформациям, то на поверхности сосуда появляется иней и снег, то необходимо извлечь жидкий азот. Далее необходимо оставить сосуд в помещении, чтобы он нагрелся до комнатной температуры. Не стоит допускать в помещение лиц, которые не уведомлены в этом.

В случае, когда нужно перелить жидкий азот, персонал должен использовать необходимые средства защиты. Защитные очки, рукава и перчатки. Чтобы исключить попадания азота на кожу и появления ожогов, необходимо плотно закрывать одежду, чтобы не было открытых участков тела.

Данный процесс должен происходить как можно аккуратнее. Не допустимо попадание азота на внешние стенки сосуда.

Строго запрещено проливать жидкий азот. В случае утечки необходимо незамедлительно проветрить помещение. При этом помещения, предназначенные для переливания или слива азота не должны иметь воспламеняющихся покрытий.

#### **6.4 Правила безопасности при проведении работ с вакуумными насосами**

В вакуумной системе используются три системы откачки.

Для допуска к работе с системами откачки персонал должен пройти проверку комиссии предприятия и получить соответствующий документ, подтверждающий их допуск.

Так как насосы имеют элементы, вращающиеся на большой скорости, необходимо обеспечить защиту от доступа к этим элементам во время работы. Нужно учитывать необходимое расстояние при установке ограждений.

Данные ограждения должны быть устойчивыми и не создавать чрезвычайных ситуаций, не связанных с вращающимися элементами насосов. При этом они должны в полной мере ограничивать препятствовать действиям персонала, которые могут причинить им вред. Они должны быть выполнены с элементами, которые позволят наблюдать за работой насоса, а в случае технического осмотра или ремонта должны легко убираться.

Сами насосы должны быть выполнены без острых углов или поверхностей, которые могут нанести ущерб имуществу или здоровью обслуживаемого персонала. Все металлические поверхности должны быть качественно обработаны и зашлифованы.

Во время настройки, наладки систем откачки может возникнуть неудобство от ограждений. В этих случаях необходимо использовать другие виды защиты.

Готовые к работе системы откачки не должны допускать попадание внутрь пыли, грязи. Необходимо регулярно проводить очистительные работы.

Все элементы фильтрации также должны периодически проверяться и очищаться во время технического обслуживания.

При работе с насосами необходимо тщательно контролировать использование масла. Не допускать утечек. Если утечка возникла, то необходимо срочно чистить место пролива, найти и устранить утечку, а также восполнить масло в в устройстве.

Все элементы систем откачки должны иметь ограничители и быть настроены таким образом, чтобы не возникало давление, недопустимое для проведения дальнейших работ.

В системах должны использоваться только исправные приборы измерения давления, возможно также использование чувствительных элементов для предотвращения скопления грязи внутри рабочей полости.

В системах обязательно должна обеспечиваться защита от возникновения обратного хода насоса после окончания проведения работ. Насосы должны полностью останавливаться.

Чтобы обеспечить безопасность работы с элементами, работающими на сходном отверстии насосов, нужно устанавливать аварийные элементы перекрытия, выпуска газа и т.д.

Так как внутри насосов работают элементы на больших скоростях, то могут возникать вибрации. Поэтому все элементы должны быть надежно закреплены, при необходимости возможно использование демпфирующих устройств, для гашения вибраций.

Все оборудование должно проходить обязательные проверки по обеспечению устойчивости.

Многие насосы имеют большую массу. Масса одного насоса может достигать 4000 кг. Перемещение насосов должно происходить аккуратно в соответствии с правилами проведения работ на высоте с грузоподъемными механизмами. Все элементы креплений должны быть проверены, удовлетворять всем параметрам грузоподъемности и находиться в исправном состоянии.

В работе золотниковых и турбомолекулярных насосов есть элементы, движущиеся на больших скоростях. Для того, чтобы исключить перегрев составляющих частей насосов, используется система охлаждения жидким азотом. Если в системе охлаждения появляется какая-либо неисправность, то работа системы охлаждения останавливается. При возникновении данной ситуации необходимо устанавливать в корпусах насосов температурные датчики, которые будут останавливать работу насосов в случае повышения температуры больше допустимой.

Все электродвигатели, которые задают вращение элементов, должны быть устойчивы и надежно закреплены. Необходимо проводить периодическую проверку на наличие люфтов, зазоров и прочих деформаций.

Конструкция корпуса насоса должна выдерживать все вибрации механизмов и воспринимать нагрузки, возникающие из-за резких остановок или изменения скорости вращения механизмов.

В процессе работы необходимо учитывать случаи разрушения движущихся элементов насоса. То есть нужно ставить дополнительную защиту, а сам корпус должен быть максимально крепким.

Работа криогенных насосов основана на конденсации откачиваемого газа на криогенной поверхности. Если остаточные газы начнут выходить с криогенной поверхности в закрытом пространстве с большой скоростью, то возможно возникновение аварийных и чрезвычайных ситуаций. Поэтому используются специальные средства, которые будут восполнять давление. Эти средства могут использоваться для работы с любыми элементами системы, на которые может действовать высокое давление.

Через криогенные насосы и криопанель протекает жидкий азот температурой около  $-195^{\circ}\text{C}$ . Поэтому все элементы системы сверхвысоковакуумной откачки, через которые протекает жидкий азот, или, которые находятся вблизи действия азота, должны быть выполнены из материалов, предназначенных для работы с такими низкими температурами.

## **6.5 Правила безопасности при проведении работ на высоте с грузоподъемными механизмами**

Данная вакуумная установка является крупногабаритной и имеет возможность производить загрузку объекта испытаний вертикально. Соответственно загрузка происходит высоте более 30 метров с помощью грузоподъемных механизмов.

Предприятие должно быть зарегистрировано в гос. реестре.

Чтобы иметь допуск к работе на высоте с грузоподъемными механизмами персонал должен пройти проверку с соблюдением всех норм и правил ПБ 10-382-00 (Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов) и получить соответствующий документ, подтверждающий их допуск.

При работе с грузоподъемными механизмами следует соблюдать все ограничения паспорта оборудования и инструкций. Недопустимо превышения массы груза заданной производителем данного оборудования.

Все грузоподъемные механизмы должны своевременно проходить проверки и техническое обслуживание. В случае возникновения каких-либо неполадок или повреждений устройство не может быть допущено к проведению дальнейших работ.

Во время подъема груза и его перемещения выполняющий работу человек обязан в полной мере контролировать работу и окружающее пространство вокруг оборудования и груза. Проведение всех операций должно происходить под контролем ответственного лица. Строго запрещается держаться за груз, опираться на него, быть под грузом, садиться или вставать на него.

Для работ на высоте предусмотрены специальные площадки. Поверхности этих площадок должны иметь шероховатость для большей устойчивости персонала. Не допускается загрязнение площадки различными жидкостями, а также посторонними предметами.

Ограждения площадок должны быть хорошо закреплены и обладать устойчивостью. Перебираться через ограждения и передавать инструменты с площадки вниз строго запрещено.

Персонал должен иметь страховку соединяющую конструкцию м страховочным поясом. Все инструменты также должны крепиться к этому поясу и быть пронумерованным.

#### 6.5.1 Правила безопасности при проведении работ с подъемным краном

Подъемные краны используются для подъема и переноса крупногабаритных объектов на большую высоту. Для безопасного проведения работ необходимо обеспечивать следующие требования:

- проверять техническое состояние грузоподъемных механизмов, приспособлений, крепежей;
- проверять крановые пути;
- поддержание оборудования в исправном состоянии;
- регулярный осмотр и ремонт оборудования;
- соблюдение всех правил безопасности обслуживающим персоналом.

#### 6.5.2 Правила безопасности при проведении работ на подъемнике

Персонал должен получить допуск к работе на вышке, то есть пройти проверку комиссии предприятия и получить соответствующий документ, подтверждающий их допуск. Персонал обязан проходить периодическую проверку и медицинский осмотр.

При работе с подъемником управляющий подъемника должен иметь возможность видеть рабочего, находящегося на поднятой вышке. Если эта возможность отсутствует, то на вышке должен быть пульт по управлению вышкой. В случае, когда управление с вышки не возможно и управляющий не имеет возможность видеть рабочего на вышке, то необходимо назначить третьего человека, который будет со стороны наблюдать и руководить действиями рабочих.

На вышке могут работать два человека, но если площадь не менее 1 м<sup>2</sup> и если позволяет грузоподъемность вышки.

### **6.6 Правила безопасности при проведении работ с электрооборудованием**

Чтобы иметь допуск к работе с электрооборудованием различных систем персонал должен пройти проверку комиссии предприятия и получить соответствующий документ, подтверждающий их допуск. А также персонал должен изучить меры безопасности работы с электрооборудованием. Персонал должен пройти медицинский осмотр.

Работа начинается с инструкций и разрешения от руководителя персонала.

Чтобы избежать возникновения чрезвычайных ситуаций запрещается проводить работы по ремонту, настройке электрооборудования во время работы и под напряжением.

Как и в случае с насосами все вращающиеся элементы электрооборудования должны быть ограничены в доступе с учетом необходимых расстояний, с возможностью доступа по окончании работ.

На электрооборудовании обязательно должны использоваться надписи, таблички или знаки, сообщающие персоналу об опасности. Снимать данные таблички строго запрещено.

Если в оборудовании имеются приборы для проведения измерений, то они должны соответствовать нормам, не иметь дефекты.

Строго запрещается подключать кабели, предохранители и любые другие элементы в оборудовании при наличии напряжения. Также строго запрещено касаться проводов, по которым идет ток, проводить их чистку. Запрещается использовать оголенные провода.

В случае возникновения чрезвычайной ситуации пострадавшему необходимо оказать первую помощь.

Если пострадавший продолжает подвергаться воздействию электрического тока, то нужно срочно отключить электрооборудование, через которое идет ток, от сети. Далее немедленно вызвать скорую помощь.

Пострадавшего следует положить на ровную поверхность, обеспечить покой.

Для облегчения дыхания стоит убрать одежду, которая может препятствовать дыханию. Если у пострадавшего наблюдается потеря сознания, но равное дыхание и пульс, то необходимо аккуратно использовать нашатырный спирт.

### **6.7 Правила пожарной безопасности**

Все работы с вакуумной установкой проводятся в помещениях. Чтобы обеспечить безопасную работу необходимо установить в помещениях средства тушения, проводить их своевременную замену и проверку.

Курение в помещениях строго запрещено.

Легковоспламеняющиеся жидкости должны храниться в специальном помещении. Хранение таких жидкостей на рабочих местах недопустимо.

При работе с насосами и другими механизмами, требующими масла, нельзя допускать утечек. Должен осуществляться постоянный контроль мест возможных утечек масла.

Так как все элементы нуждаются в проведении технического обслуживания, в процессе проведения этих работ могут использоваться горючие чистящие средства. Ткань для чистки, применяемая с горючими жидкостями не должна храниться на рабочем месте после завершения работ. Если данные жидкости попали на одежду персонала, то перед повторным использованием одежда должна быть почищена.

При возникновении любого возгорания необходимо отключить общее электроснабжение во всем помещении, вызвать пожарную помощь и самостоятельно начать тушить пожар. Если потушить пламя собственными силами не получается, то нужно срочно покинуть здание. В случае если автоматическая пожарная сигнализация не сработала, то нужно включить ее самостоятельно.



## 7 ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В данном разделе дипломной работы представлено экономическое обоснование разработки крупногабаритной вакуумной установки.

Цель экономического обоснования заключается в том, чтобы определить целесообразность проектирования вакуумной установки.

Чтобы определить экономическую целесообразность проектируемой установки рассчитаем затраты нужные для расчета и производства опытного образца. Эти затраты включают в себя затраты на работу по проектированию вакуумной установки, затраты на закупку материалов и комплектующего оборудования.

В ходе анализа стоит учитывать, что данная разработка является некоммерческим продуктом, поэтому не будет массово производиться и широко распространяться среди предприятий.

Целью создания данной вакуумной установки является научная сторона изучения герметичности объектов испытаний, а не получение прибыли от этой разработки.

В себестоимость разработки включаем все затраты, связанные с ее выполнением. Источник финансирования учитывать не будем. Себестоимость включает в себя:

- основную и дополнительную заработную плату исполнителя;
- страховые взносы на обязательное пенсионное страхование и фонды социального страхования;
- затраты направленные на расходные материалы;
- прочие и накладные расходы.

Расходные материалы, которые были использованы в ходе проведения разработки данной установки, включают в себя: программное обеспечение MS Office 2019, AutoCAD 2015, бумага, тонер для принтера Samsung SCX-4220. В таблице 1 указаны затраты на все расходные материалы.

Таблица 1 – Затраты на расходные материалы

Наименование материала	Кол-во	Цена, руб.	Сумма затрат, руб.
Канцелярские товары	-	-	300
Программное обеспечение MS Office 2019	1 шт.	5900	5900
AutoCAD 2015	1 шт.	8530	8530
Бумага для офисной техники	1 пачка	300	300
Тонер для принтера Samsung SCX-4220	1 шт.	1000	1000
Итого:			15930

Затраты связанные с основной заработной платой исполнителя рассчитываются с учетом всех этапов работы по проектированию вакуумной установки. Необходимо учитывать продолжительность и трудоемкость этих этапов. Затраты времени на создание единицы продукции или определенной части работы определяются трудоемкостью.

Время, потраченное за день проектирования, равно 8 часам. Примем выражение затраченного труда на выполнение каждого этапа проектирования в человеко-месяц. В месяце 22 рабочих дня.

Затраты на основную заработную плату исполнителя приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Затраты на основную заработную плату исполнителя

Наименование этапа	Трудоемкость этапа, чел/день	Трудоемкость этапа, чел/мес.	Заработная плата, руб.	Затраты по заработной плате, руб.
Разработка и утверждение технического задания	1	0,045	25000	1125,00
Изучение литературы	4	0,182	25000	4550,00
Разработка эскизного проекта	7	0,318	25000	7950,00
Разработка геометрических моделей и чертежей	14	0,636	25000	15900,00

Наименование этапа	Трудоемкость этапа, чел/день	Трудоемкость этапа, чел/мес.	Заработная плата, руб.	Затраты по заработной плате, руб.
Разработка маршрутной и операционной технологии работы	10	0,455	25000	11375,00
Подготовка документации	14	0,636	25000	15900,00
Итого:				56800,00

Сумма дополнительной заработной платы исполнителя составляет 20% от суммы основной заработной платы:

$$\Phi_{\text{дон}} = \frac{56800 \cdot 20\%}{100\%} = 11360 \text{ руб.}$$

Определим страховые взносы на обязательное пенсионное страхование и фонды социального страхования. В сумме взносы составляют 30,2% от суммы общей заработной платы исполнителя:

$$CB = \frac{(56800 + 11360) \cdot 30,2\%}{100\%} = 20584,32 \text{ руб.}$$

Рассчитаем затраты на накладные расходы, которые находятся в промежутке от 180% до 250% от величины основной заработной платы исполнителя. Выберем минимальное значение, то есть значение равное 180%. Исходя из этого, затраты на накладные расходы можно найти по формуле:

$$HP = \frac{56800 \cdot 180\%}{100\%} = 102240 \text{ руб.}$$

Затраты на прочие расходы рассчитаем по формуле (85). Эти затраты включают в себя стоимость времени работы с ПЭВМ на разработку вакуумной установки и подготовку всей технической документации.

$$Z_{np} = N \cdot C_{мч} \cdot K_{загр}, \quad (85)$$

где  $N$  - количество часов, необходимых для разработки вакуумной установки и подготовку технической документации;

$Смч$  - стоимость машино-часа включает стоимость профилактических работ, стоимость затраченной электроэнергии, расходных материалов, равная 50 рублям;

$Кзагр$  - коэффициент загрузки ПЭВМ, равный 0,7–0,9.

Количество часов  $N$  можем найти по таблице 2. Дни, которые были затрачены на выполнение этапов, примем равными 8 часам. Таким образом:

$$N = (1 + 4 + 7 + 14 + 10 + 14) \cdot 8 = 392 \text{ часа},$$

$$З_{пр} = 392 \cdot 50 \cdot 0,7 = 13720 \text{ руб.}$$

Суммарные затраты на покупку расходных материалов, основную и дополнительную заработную плату рабочих, страховые взносы на обязательное пенсионное страхование и фонды социального страхования, накладные и прочие расходы приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Суммарная себестоимость проектирования вакуумной установки

Наименование этапа	Затраты, руб.
Затраты на приобретение расходных материалов	15930,00
Затраты на основную заработную плату рабочих	56800,00
Затраты на дополнительную заработную плату рабочих	11360,00
Затраты на страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования	20584,32
Накладные расходы	102240,00
Прочие расходы	13720,00
Итого:	220634,32

Чтобы произвести опытный образец, необходимо оборудование, список и стоимость которого приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Расходы на приобретение комплектующих изделий

Наименование изделия	Кол-во	Цена, руб.	Сумма, руб.
Вакуумная камера	1	150243700,00	150243700,00
Вакуумный насос HSR VELCO 801	3	15000000,00	45000000,00

Продолжение таблицы 4

Наименование изделия	Кол-во	Цена, руб.	Сумма, руб.
Вакуумный насос Shimadzu FT-6300 WH	4	6000000,00	24000000,00
Вакуумный насос НВЗ-500	5	1006000,00	5030000,00
Гелиевый течеискатель ТИ1-50	1	750000,00	750000,00
Запорная арматура ЗВЭ-1000	3	125463,00	376389,00
Запорная арматура ЗВЭ-800	3	75779,00	227337,00
Запорная арматура ЗВЭ-500	4	71382,00	285528,00
Запорная арматура ЗВЭ-400	10	64939,20	649392,00
Ловушка ЛА-400	5	72400,00	362000,00
Вакуумметр ВТСО-1	2	32590,00	65180,00
Вакуумметр ВДГ-1	2	21403,00	42806,00
Вакуумметр ВМБ-14	3	19509,18	58527,54
Вакуумметр ВИ-14	3	6649,81	19949,43
Трубопровод	1	267000,00	267000,00
Итого:			227377809,00

Необходимо учитывать затраты на рабочие вещества, которые используются в подготовке, проверке и в самих испытаниях.

Затраты на основные рабочие вещества указаны в таблице 5.

Таблица 5 – Затраты на основные рабочие вещества

Наименование изделия	Объем, л.	Цена, л./руб.	Сумма, руб.
Жидкий гелий	1000	1550	1550000
Жидкий азот	1000	20	20000
Сжатый воздух	1000	400	400000
Дизельное топливо	1000	46,5	46500
Вакуумное масло ВМ-4	300	550	165000
Гидравлическая жидкость	300	320	96000
Итого:			2277500

Таким образом, итоговая стоимость проектирования вакуумной установки с учетом всех затрат составила 229677374 рубля.

В результате эксплуатации данной крупногабаритной вакуумной установки на предприятии можно получить такие выгоды как:

- сокращение обслуживающего персонала за счет использования оборудования для автоматизации испытаний;

- сокращение времени, затрачиваемого на подготовку вакуумной системы за счет того, что все системы откачки подключены к вакуумной камере и находятся в работоспособном состоянии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе реализации выпускной квалификационной работы по теме «Проектная разработка крупногабаритной вакуумной установки для проведения проверок лунных долговременных обитаемых комплексов на воздействие внешней среды» были изучены и разработаны следующие разделы и этапы работы:

1) Общие сведения, в котором описаны основные понятия и определения, а также описание основ различных частей и оборудования данной вакуумной установки.

2) Проектный расчет вакуумной системы. Данный раздел содержит расчет газовых нагрузок системы, выбор вакуумной схемы и вакуумных насосов для трех систем откачки, а также определение размеров трубопроводов и других элементов вакуумной системы;

3) Описание установки. Описание включает в себя выбор вида вакуумной камеры, описание различных систем конструкции и их назначение. Этот раздел также содержит выбор оборудования для проверки герметичности, устройства контроля давления различных диапазонов и описание сопутствующих систем;

4) Описание вакуумных испытаний. Испытания состоят из двух видов:

- тепловакуумные испытания, в процессе проведения которых на объект испытаний могут оказываться два или более факторов. В основном это пониженное давление окружающего пространства и широкий диапазон температур;

- вакуумно-температурные испытания, которые подразумевают проверку работоспособности объекта испытаний в условиях критических температур окружающей среды.

5) Технологическая часть. Данный раздел включает в себя алгоритм необходимых действий при проведении работ с вакуумной установкой, а именно:

- технологию подготовки оборудования и объекта испытаний к работе;

- технологию проведения вакуумирования камеры;
- процесс вакуумирования.

б) Безопасность жизнедеятельности. В этом разделе приведен список требований безопасной работы с вакуумной установкой. Цель требований заключается в предотвращении возникновения аварийных ситуаций, которые могут нанести угрозу для жизни, а также здоровью обслуживающего персонала при работе с системой;

7) Организационно-экономическая часть. Раздел содержит расчет всех затрат и итоговую себестоимость разработки, обоснование целесообразности данной работы

Крупногабаритная вакуумная установка позволяет проводить испытания как отдельных узлов, механизмов и агрегатов, так и крупногабаритных объектов, таких как космические аппараты, космические модули и долговременные обитаемые лунные комплексы целиком.

За счет используемых различных систем откачки есть возможность проводить испытания в широком диапазоне давлений. А с помощью использования системы имитации космических излучений есть возможность проводить испытания в условиях близких к реальным условиям космического пространства.

В результате проделанной работы следует отметить, что данная разработка имеет как теоретическую, так и экономическую выгоду от использования данной крупногабаритной вакуумной установки.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Криогенные системы: учебник для вузов по специальности «Техника и физика низких температур» / А. М. Архаров [и др.]. – М.: Машиностроение, 1996 – 576 с.
2. Вакуумная техника: справочник / Е. С. Фролов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1992 – 471 с.
3. Шестак, В. П. Вакуумная техника. Концепция разряженного газа: учебное пособие / В. П. Шестак. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012 – 272 с.
4. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника: учебник для вузов. / Л. Н. Розанов. – М.: Высшая шк., 2007 – 391 с.
5. Юрьева, А. В. Расчет вакуумных систем: учебное пособие. / А. В. Юрьева. – Томск: Томский политехнический университет., 2012 – 114 с.
6. Демихов, К. Е. Вакуумная техника: справочник. / К. Е. Демихов, Ю. В. Панфилов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2009 – 590 с.
7. Пипко, А. И. Конструирование и расчет вакуумных систем: учебное пособие. / А. И. Пипко, В. Я. Плисковский, Е. А. Пенчко – М.: Энергия, 1979 – 504 с.
8. Кузнецов, В. И. Эксплуатация вакуумного оборудования: учебное пособие. / В. И. Кузнецов., Н. Ф. Немилов, В. Е. Шемякин – М.: Энергия, 1978 – 208 с.
9. Нусинов, М. Д. Космический вакуум и надежность космической техники: справочник. / М. Д. Нусинов – М.: Знание, 1986 – 64 с.
10. Фролов, Е.С., Механические вакуумные насосы: учебное пособие. / Е. С. Фролов, В. И. Автономова – М.: Машиностроение, 1989 – 288 с.
11. Данилин, Б.С. Основы конструирования вакуумных систем: учебное пособие. / Б. С. Данилин, В. Е. Минаев – М.: Энергия, 1971 – 392 с.
12. Вакуумные системы и их элементы: учебное пособие. / Е. С. Фролов [и др.] – М.: Машиностроение, 1968 – 200 с.

13. Курашов, В.И. Вакуумная техника: средства откачки, их выбор и применение: учебное пособие. / В. И. Курашов, М. Г. Фомина – КГТУ, 1997 – 52 с.

14. Баррон, Р. Ф. Криогенные системы: учебное пособие : пер. с англ. / Р. Ф. Баррон – М.: Энергоатомиздат, 1989 – 408 с.