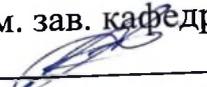




Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет инженерно-физический  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ  
Зам. зав. кафедрой  
  
В.В.Соловьев  
« 20 » апреля 2020 г.

### ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Толстошеева Константина Александровича

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

(утверждена приказом от 14.04.2020 №711-уч)

2. Срок сдачи студентом законченного проекта: 14.07.2020

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 откачки до  $P_{исп} \leq 10^{-6}$  Па до 36 часов; время форвакуумной откачки  $P_{ф} \leq 10^{-1}$  Па до 6 часов.

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

5. Перечень материалов приложения: общий вид, общий вид с разрезами, схема членения, компоновка вакуумной системы в сооружении, схема вакуумной системы, алгоритм испытаний, центробежный насос, вал насоса, рабочее колесо.

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

7. Дата выдачи задания: 20.03.2020

Руководитель выпускного квалификационного проекта: А.В. Козырь.

Задание принял к исполнению (дата): 20.03.2020 Толстой

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 110 страниц, 29 рисунков, 9 таблиц, 16 источников.

ВАКУУМНАЯ КАМЕРА, ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ НАСОС, ЖИДКОСТНОЙ НАСОС, ТЕЧЕЙСКАТЕЛЬ, ВАКУУМ, ЗОЛОТНИКОВЫЙ НАСОС, ТРУБОПРОВОД

Цель работы – проектная разработка 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) Составить описание установки;
- 3) Составить технологическую часть;
- 4) Провести специальную часть;
- 5) Описать меры безопасности при проведении работ на вакуумной станции;
- 6) Экономически обосновать разработку и использование вакуумной установки.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	8
1.1 Понятие вакуума.....	8
1.2 Устройство вакуумной установки.....	9
1.2.1 Вакуумная камера.....	10
1.2.2 Система вакуумной откачки.....	12
1.2.3 Система терморегулирования.....	14
1.2.4 Запорно – регулирующая аппаратура.....	15
1.2.5 Вакуумные ловушки.....	16
1.2.6 Течеискатели.....	16
2 ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ.....	18
2.1 Расчет газовых нагрузок.....	18
2.2 Расчет вакуумной системы.....	22
2.2.1 Выбор вакуумной схемы.....	22
2.2.2 Выбор вакуумных насосов.....	23
2.2.3 Определение конструктивных размеров трубопроводов и выбор элементов вакуумной системы.....	29
3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ.....	42
3.1 Общая структура.....	42
3.1.1 Вакуумная камера.....	42
3.1.2 Система откачки.....	45
3.1.2.1 Золотниковый насос.....	45
3.1.2.2 Турбомолекулярный насос.....	48
3.1.2.3 Криогенный насос.....	49
3.1.2.4 Форвакуумная азотная ловушка.....	51
3.1.2.5 Вакуумные трубопроводы.....	53
3.1.2.6 Запорно-регулирующая арматура.....	54
3.1.2.7 Манометрические преобразователи.....	55
3.1.3 Система разгерметизации.....	57
3.1.4 Система зарядки сжатыми газами.....	58
3.1.5 Гелиевый течеискатель ТИ1-50.....	59
3.1.6 Система рециркуляции азота.....	61

3.1.7	Запасные части, инструменты и принадлежности.....	61
4	ВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЙ.....	63
4.1	Тепловакуумные испытания.....	63
4.2	Вакуумно-температурные испытания .....	64
5	ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	67
5.1	Технология проведения вакуумирования камеры.....	67
6	СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ .....	72
6.1	Виды систем водяного охлаждения .....	72
6.1.1	Замкнутые системы охлаждения .....	72
6.1.2	Незамкнутые (проточные) системы охлаждения.....	76
6.1.3	Открытые системы охлаждения (испарительное охлаждение).....	77
6.2	Расчет и выбор насоса системы водяного охлаждения.....	79
6.2.1	Расчет производительности центробежного насоса .....	81
6.2.2	Расчет напора .....	81
3.2.3	Определение основных размеров насоса.....	83
7	БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ .....	86
7.1	Меры безопасности при проведении работ на вакуумной станции .....	86
7.1.1	Общие правила безопасности труда .....	86
7.1.2	Основные требования охраны труда при проверке масс-спектрометрическим методом.....	88
7.2	Меры безопасности при работе со сжатыми газами .....	89
7.3	Меры безопасности при работе с жидким азотом.....	90
7.4	Меры безопасности при работе с вакуумными насосами .....	91
7.5	Меры безопасности при выполнении работ с применением грузоподъемных механизмов и на высоте.....	94
7.5.1	Основы техники безопасности при работе с кранами.....	95
7.5.2	Основы техники безопасности для рабочих люльки, находящихся на подъемнике (вышке) .....	96
7.6	Меры пожарной безопасности .....	97
7.7	Меры безопасности при работе с электрооборудованием .....	97
8	ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	100
8.1	Календарный план работы над проектированием вакуумной установки	100
8.2	Себестоимость проектирования вакуумной установки .....	101
8.3	Оценка косвенного экономического эффекта .....	106
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	107

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	109
--------------------------------	-----

## ВВЕДЕНИЕ

Вакуум — пространство, свободное от вещества. В технике и прикладной физике под вакуумом понимают среду, состоящую из газа при давлении значительно ниже атмосферного. Вакуум характеризуется соотношением между длиной свободного пробега молекул газа и характерным размером среды.

Космическое пространство, в котором сейчас функционируют космические аппараты, весьма различается по своим физическим характеристикам. Это и верхние слои атмосфер Земли, других планет, некоторых их спутников и кометных ядер, это и межпланетное пространство, это, наконец, и межзвездное пространство. В связи с этим являются различными и условия космического вакуума, в которых работают системы космических аппаратов.

Например, астрономические наблюдения показывают, что межзвездное пространство в областях ионизованного водорода характеризуется средней концентрацией частиц около  $10^6 \text{ м}^{-3}$  и температурой порядка 100 К. Иные характеристики вакуума в межпланетном пространстве, которое заполнено частицами межпланетной плазмы, имеющими в основном солнечное происхождение. Вообще говоря, условия в межпланетном пространстве широко варьируют в зависимости от солнечной активности, изменяющейся с 11-летним и другими циклами.

# 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

## 1.1 Понятие вакуума

Вакуумом (от лат. *vacuum* — пустота) называют состояние разреженного газа, когда давление его значительно ниже атмосферного. Количественной характеристикой вакуума служит абсолютное давление. Вакууму обычно соответствует область давлений ниже  $10^5$  Па. В технике вакуум получают с помощью вакуумных насосов различных принципов действия.

Интенсивность протекания физико – химических процессов в вакууме зависит от соотношения между числом столкновений молекул со стенками сосуда и числом взаимных столкновений молекул, что характеризуется существенным для конкретного рассматриваемого процесса отношением средней длины свободного пути молекул  $\lambda$  к характерному (определяющему) линейному размеру  $l$  сосуда; это отношение, называемое числом Кнудсена  $Kn$ , положено в основу условного разделения областей вакуума на следующие диапазоны: низкий, средний, высокий и сверхвысокий.

Степень разрежения, достигаемая в откачиваемых сосудах, определяется равновесным давлением, устанавливающимся под действием двух противоположных процессов: откачки газа с помощью насосов и натекания его через неплотности, а также в результате технологического газовыделения.

Низкий вакуум характеризуется разрежением газа, при котором средняя длина свободного пути частиц во много раз меньше характерного линейного размера, существенного для рассматриваемого процесса ( $\lambda \ll l$ ). Низкому вакууму обычно соответствует область давлений от  $10^5$  до 100 Па.

Средний вакуум характеризуется разрежением газа, при котором средняя длина свободного пути частиц соизмерима с характерным линейным размером существенным для рассматриваемого процесса ( $\lambda \approx l$ ). Среднему вакууму обычно соответствует область давлений от 100 до 0,1 Па.

Высокий вакуум характеризуется разрежением газа, при котором средняя длина свободного пути частиц значительно превышает характерный линейный

размер, существенный для рассматриваемого процесса ( $\lambda \gg l$ ). Высокому вакууму обычно соответствует область давлений от 0,1 до  $10^{-5}$  Па.

Сверхвысокий вакуум характеризуется разрежением газа, при котором не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от адсорбированного газа, на время, существенное для рабочего процесса. Сверхвысокому вакууму обычно соответствует область давлений ниже  $10^{-5}$  Па.

## **1.2 Устройство вакуумной установки**

Вакуумные установки – установки, состоящие из вакуумной системы (вакуумные насосы, датчики, клапаны, ловушки, арматура) и устройств, обеспечивающих ее действие для проведения какого-либо технологического процесса. К таким установкам можно отнести вакуумные установки для лабораторных исследований, высотные испытательные установки, установки имитации космического пространства, полупроводниковые и напылительные вакуумные установки, вакуумные печи и т.д.

Установки имитации космического пространства, позволяют исследовать влияние космического и солнечного излучений, космического холода и др. (в зависимости от поставленной задачи) требуют обеспечения вакуума в широком диапазоне: от среднего ( $10^{-3}$  мм рт. ст.) до сверхвысокого ( $10^{-10}$  мм рт. ст.). При этом вакуумная среда в имитаторах должна быть абсолютно безмасляной. Поэтому для получения низкого вакуума используются сухие винтовые и двухроторные насосы, для среднего и высокого вакуума применяются турбомолекулярные насосы на магнитном подвесе, а для сверхвысокого – криогенные насосы с замкнутым циклом Гиффорда–МакМагона.

Виды установок имитации космического пространства:

1. Колпаковые вакуумные камеры.
2. Цилиндрические вакуумные камеры.
3. Кубические вакуумные камеры.
4. Вертикальные камеры со съёмной крышкой.
5. D – образные вакуумные камеры.

В зависимости от поставленных задач, выбирается необходимая конфигурация установки, однако наибольшее распространение получили именно вертикальные установки со съемной крышкой благодаря своей простоте, а в случае многосекционных вертикальных установок – возможности унифицировать камеру под различные задачи.

Часто оценить воздействие космического вакуума на материалы космических аппаратов удастся только при моделировании космического вакуума в земных лабораториях. Следует отметить, что моделирование отличается от имитации, когда тождественно воспроизводятся космические условия. В случае лабораторного физического моделирования условия могут существенно отличаться от действительных, смещаясь в сторону менее жестких ограничений на параметры среды (например, с использованием более высоких давлений в вакуумных установках, чем в космическом вакууме).

Главная цель такого моделирования – определить реакцию исследуемой космической системы на воздействия условий космического пространства. При лабораторном (физическом) моделировании параметры вакуумной установки варьируются экспериментатором по желанию, в то время как при имитационных, так и в космических экспериментах эти параметры predeterminedены и жестко фиксированы. Тем не менее закономерности, выявленные в результате лабораторного моделирования, позволяют ориентировочно прогнозировать поведение исследуемой системы в самых разнообразных условиях космического полета.

Для всех без исключения процессов и явлений, характерных для космического вакуума, существует свой определенный граничный интервал значений давления среды. Это обстоятельство позволяет использовать в качестве основных критериев моделирования ограниченные интервалы давлений.

### **1.2.1 Вакуумная камера**

Вакуумные камеры предназначены для создания определенных условий для исследования или проведения процессов в вакууме или контролируемой

среде, а также изоляции технологических процессов (операций) от контакта с окружающей средой.

Вакуумные камеры представляют собой часть вакуумной системы. К ним предъявляют следующие основные требования: обеспечение необходимого для технологического процесса давления  $p_o$  остаточного газа и парциального давления  $p_i$  его составляющих; получение необходимых вакуумных условий в заданное время  $t$ .

Для выполнения этих требований при проектировании вакуумной системы определяют поток откачиваемого газа  $Q$  во времени, по которому рассчитывают быстроту откачки системы  $S_o$  и выбирают насосы, обеспечивающие необходимые параметры  $S_o$ ,  $p_o$ ,  $p_i$  и  $t$ .

В общем виде для определения потока  $Q$  необходимо знать объем площадь поверхности  $F_K$ , находящейся в вакууме, материал и температуру камеры и ряд других параметров, характерных для каждой конкретной установки и влияющих на значение и характер потока  $Q$ .

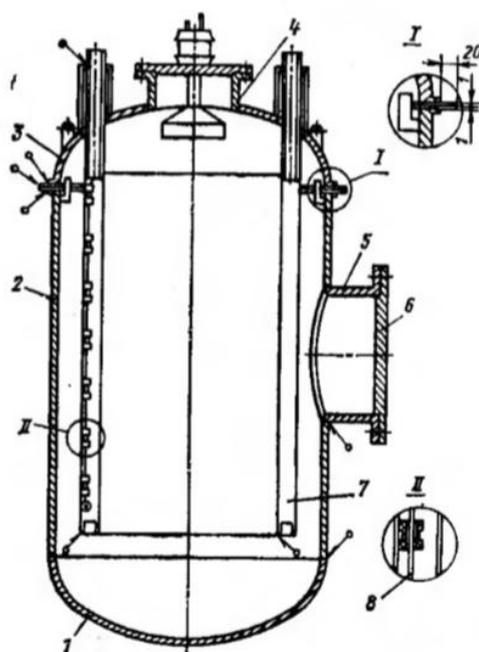


Рисунок 1 – Сверхвысоковакуумная прогреваемая камера и ее элементы  
1 – днище; 2 – обечайка; 3 – крышка; 4,5 – патрубок; 6 – фланец; 7 – азотит; 8 – нагреватель.

В зависимости от требований вакуумные камеры подразделяют на низковакуумные, высоковакуумные и сверхвысоковакуумные. Кроме того, к ним могут быть предъявлены требования по чистоте вакуума (допустимо наличие углеродсодержащих компонентов в остаточном газе или нет). Для получения безмасляного и сверхвысокого вакуума вакуумные камеры прогревают, что накладывает дополнительные требования к их конструктивным элементам. В связи с этим обычно различают два типа камер: непрогреваемые и прогреваемые. Вакуумные камеры, как правило, изготавливают из металлов, хотя в лабораторной практике для этих целей часто применяют стекло.

Основными конструктивными элементами вакуумных камер являются обечайки, днища, крышки, патрубки и фланцы.

### 1.2.2 Система вакуумной откачки

1) Механические вакуумные насосы – действие механических вакуумных насосов основано на механическом сжатии и выталкивании откачиваемого газа движущимися частями насоса. Механические вакуумные насосы служат главным образом для получения низкого и среднего вакуума. К этим насосам относятся поршневые, многопластинчатые, водокольцевые, двухроторные, а также вращательные насосы с масляным уплотнением (пластинчато-статорного, пластинчато – роторного и плунжерного типов).

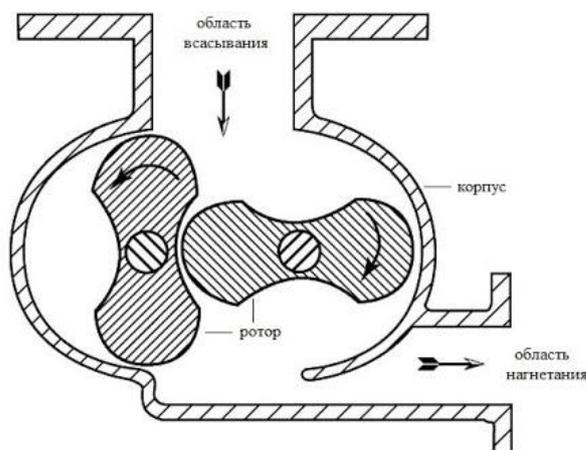


Рисунок 2 – Двухроторный насос

2) Турбомолекулярные насосы – представляет собой многоступенчатый осевой компрессор, имеющий жестко укрепленные на корпусе статорные диски и вращающиеся диски, укрепленные на роторе. Все диски содержат косые пазы, причем пазы в дисках статора являются зеркальным отражением пазов роторных дисков. В качестве дисков используются металлические шайбы толщиной в несколько миллиметров. Поэтому пазы имеют небольшую длину, вследствие чего коэффициент компрессии каждой пары дисков сравнительно невелик.

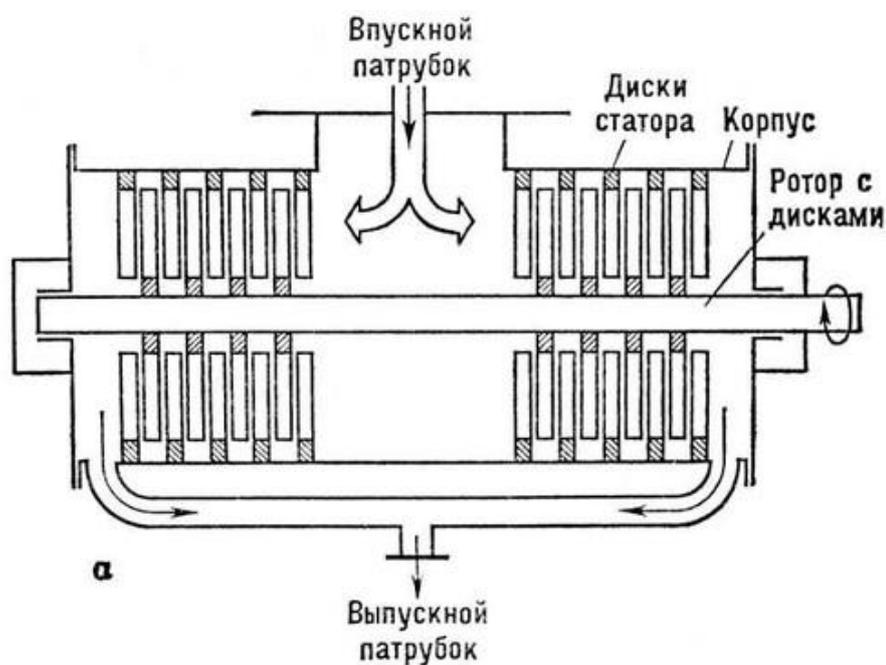


Рисунок 3 – Турбомолекулярный насос

3) Криогенные насосы – действие крионасосов основано на физических явлениях, происходящих при низких температурах, а именно: конденсации газов на охлаждаемых металлических поверхностях (криоконденсационные насосы); адсорбции газов на твердых охлажденных адсорбентах (криoadсорбционные насосы); адсорбции газов на слое предварительно сконденсированного вспомогательного легкоконденсируемого газа (конденсационно – адсорбционные насосы); совместной одновременной конденсации откачиваемого газа и вспомогательного легкоконденсируемого газа (криозахватные насосы); погло-

щении газов пленками геггера, осаждаемого на криопанель насоса (криогеттерные насосы).

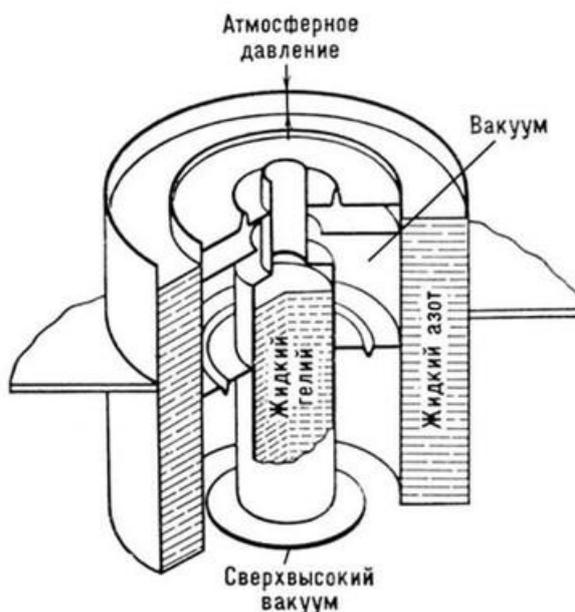


Рисунок 4 – Криогенный насос

### 1.2.3 Система терморегулирования

Прогрев вакуумных систем установок при обезгаживании часто осуществляется с помощью трубчатых электронагревателей (ТЭИ) и гибких ленточных нагревателей из термостойкой стеклоткани.

Конструктивно трубчатый электронагреватель (рис. 5) представляет собой спираль 7 из нихромовой проволоки, запрессованную в кварцевом песке или в плавленной окиси магния внутри металлической трубки 6. Оба конца спирали подсоединяют к выводным стержням 2, изолированным от трубки проходными изоляторами 3. Открытые токоведущие части выводных стержней ограждаются колпачком 1 от случайных соприкосновений. Трубки электронагревателей изготавливаются из стали, латуни или красной меди. Нагреватели с трубками из нержавеющей стали марки X18H9T обычно применяются для внутривакуумного монтажа. Диаметры трубчатых электронагревателей находятся в пределах от 7 до 19 мм. Максимальная развернутая длина нагревателей доходит до 3 м и более.

Для наружного прогрева конструктивных элементов высоковакуумных систем сложной конфигурации (вакуумных камер, коленчатых вакуумопроводов, ловушек, запорной арматуры и т. п.) с целью их обезгаживания применяют гибкие ленточные нагреватели.

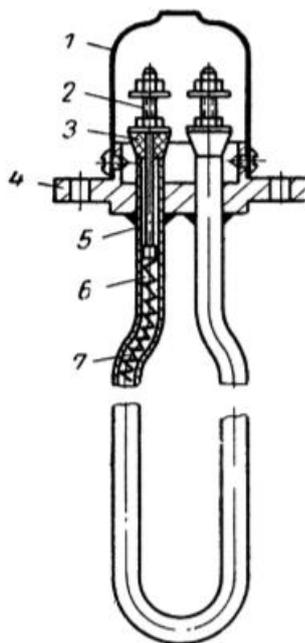


Рисунок 5 – Трубчатый электронагреватель

1 – колпачок; 2 – выводной стержень; 3 – изолятор; 4 – фланец; 5 – изоляционный слой; 6 – трубка; 7 – нихромовая спираль.

#### 1.2.4 Запорно – регулирующая аппаратура

Для герметичного перекрытия вакуумных коммуникации, осуществления грубой регулировки давлений, напуска определенных газов в рабочий объем установок применяются затворы, краны, вентили и натекатели, которые в зависимости от конкретных требований могут иметь самую различную конструкцию, форму и размеры. Краны имеют как ручное, так и дистанционное управление при помощи электромашинных, электромагнитных, гидравлических и пневматических приводов.

### **1.2.5 Вакуумные ловушки**

Вакуумными ловушками называют устройства, служащие для предотвращения проникновения паров рабочих жидкостей вакуумных насосов в откачиваемый сосуд.

В зависимости от области рабочих давлений ловушки подразделяют на высоковакуумные и форвакуумные. Высоковакуумные ловушки предназначены для улавливания паров рабочих жидкостей из диффузионных и бустерных пароструйных насосов при молекулярном режиме течения пара из насосов, форвакуумные – для улавливания паров рабочих жидкостей форвакуумных насосов при вязкостном и молекулярно – вязкостном режимах течения пара из насосов.

В зависимости от принципа действия ловушки подразделяют на механические, низкотемпературные, адсорбционные, термические и электрические. Наибольшее распространение получили механические, низкотемпературные и адсорбционные ловушки.

Основными характеристиками ловушек являются защитная способность и удельная проводимость.

### **1.2.6 Течейскатели**

При изготовлении вакуумной аппаратуры необходимыми операциями являются проверка ее герметичности, отыскание и устранение имеющихся течей. При всей тщательности изготовления вакуумных систем вообще невозможно достигнуть полного отсутствия натеканий, т. е. идеальной герметичности. Величина допускаемого натекания зависит от технологических требований к установке, от объема вакуумной системы и от производительности откачных средств.

Вывод по разделу: воздействие космического вакуума на материалы и элементы конструкций космического аппарата можно условно разделить на следующие виды: механические, теплофизические, электрофизические и воздействия на межмолекулярном уровне. Последние три вида воздействий обязательно требуют использования вакуумных условий при моделировании. При этом если для объемных теплофизических и электрофизических воздействий

важным параметром является концентрация частиц в объеме, то для поверхностных воздействий на межмолекулярном уровне – поток частиц, падающий на поверхность (или исходящий от нее).

## 2 ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

### 2.1 Расчет газовых нагрузок

Исходные данные:

$$T = 120 \text{ [}^\circ\text{C]};$$

$$P_o = 10^5 \text{ [Па]};$$

$$P_{исп} = 10^{-6} \text{ [Па]};$$

$$P_{ост} = 10^{-8} \text{ [Па]};$$

$$t_{пред} = 16 \text{ [час]};$$

$$t_{откач} = 36 \text{ [час]}.$$

Так как в техническом задании отсутствует величина потока газов, необходимо ее рассчитать.

1) Расчет суммарного потока газов:

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

2) Определим поток газов, выделяющихся из объекта испытаний  $Q_{изд}$ :

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

где  $G = 10 \text{ т}$  – масса объекта испытаний;

$q_{газ} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3\text{Па/м}^2\text{с}$  – удельное газовыделение для алюминия;

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

$t = 36 \text{ час} = 129600 \text{ с}$  – время откачки вакуумной камеры,

$$Q_{изд} = \frac{10000 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{129600} \cdot 3 = 0,14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3\text{Па/с}$$

3) Расчет потока газов, выделяющихся с поверхностей элементов  $Q_{газ}$ :

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

а) Поток газов, выделяющихся с внутренней поверхности обечайки:

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

где  $D = 20$  м;  $h = 20$  м;

$q_{обеч} = 1,2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>Па/(м<sup>2</sup>с) – скорость удельного газовыделения для нержавеющей стали;

$$Q_{обеч} = 3,14 \cdot 20 \cdot 20 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 1507,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3\text{Па/с}$$

б) Поток газов, выделяющихся с внутренней поверхности днища 1:

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

где  $R = 10$  м;  $h = 5$  м;

$q_{днищ} = 1,2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>Па/(м<sup>2</sup>с) – скорость удельного газовыделения для нержавеющей стали;

$$Q_{днищ1} = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 376,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3\text{Па/с}$$

в) Поток газов, выделяющихся с внутренней поверхности днища 2:

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

где  $R = 10$  м;  $h = 5$  м;

$q_{днищ} = 1,2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>Па/(м<sup>2</sup>с) – скорость удельного газовыделения для нержавеющей стали;

$$Q_{днищ2} = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 376,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3\text{Па/с}$$

г) Поток газов, выделяющихся с внутренней поверхности днища 3:

$$Q_{\text{днищз}} = 2\pi \cdot R \cdot h \cdot q_{\text{днищз}} \quad (7)$$

где  $R = 5$  м;  $h = 2$  м;

$q_{\text{днищз}} = 1,2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>Па/(м<sup>2</sup>с) – скорость удельного газовыделения для нержавеющей стали;

$$Q_{\text{днищз}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 75,36 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3\text{Па/с}$$

д) Поток газов, выделяющихся с внутренней поверхности штуцера:

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

где  $D = 10$  м;  $h = 8,667$  м;

$q_{\text{штуц}} = 1,2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>Па/(м<sup>2</sup>с) – скорость удельного газовыделения для нержавеющей стали;

$$Q_{\text{штуц}} = 3,14 \cdot 10 \cdot 8,667 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 326,57 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3\text{Па/с}$$

е) Поток газов, выделяющихся с поверхности конструкций, находящихся внутри вакуумной камеры:

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

где  $S_{\text{констр}} = 1055,62$  м<sup>2</sup> – площадь поверхности конструкций;

$q_{\text{констр}} = 1,2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>Па/(м<sup>2</sup>с) – скорость удельного газовыделения для малоуглеродистой конструкционной стали;

$$Q_{\text{констр}} = 1055,62 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 1266,75 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3\text{Па/с}$$

ж) Поток газов, выделяющихся с поверхности криопанелей:

$$Q_{\text{кр.пан.}} = S_{\text{пан.}} \cdot q_{\text{пан.}(Al)} \quad (10)$$

Устанавливаем 3 криопанели длиной 9,5 м, шириной 6 м и определяем площадь поверхности с двух сторон:

$$S_{кр.пан.} = a \cdot b = 9,5 \cdot 6 = 57 \cdot 3 \cdot 2 = 342 \text{ м}^2 \quad (11)$$

где  $q_{пан(Al)} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3\text{Па}/(\text{м}^2\text{с})$  – скорость удельного газовыделения для криогенных панелей;

$$Q_{кр.пан} = 342 \cdot 4 \cdot 10^{-10} = 13,68 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3\text{Па}/\text{с}$$

з) Поток газов, выделяющихся с поверхности отражателя:

$$Q_{отраж} = S_{отраж} \cdot q_{отр(Al)} \quad (12)$$

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

$q_{отр(Al)} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3\text{Па}/(\text{м}^2\text{с})$  – скорость удельного газовыделения для алю-

миния;

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

и) Поток газов, выделяющихся с поверхности инфракрасных ламп:

$$Q_{ламп} = S_{ламп} \cdot q_{стекло(Si)} \quad (13)$$

Устанавливаем инфракрасные лампы в количестве 100 шт., мощностью – 500 Вт, диаметром и длиной – 140 мм.

$$S_{ламп} = \pi \cdot R^2 + D \cdot h = 3,14 \cdot 0,07^2 + 0,14 \cdot 0,14 = 0,0196 \cdot 100 = 1,96 \text{ м}^2 \quad (14)$$

где  $q_{стекло(Si)} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3\text{Па}/(\text{м}^2\text{с})$  – скорость удельного газовыделения для стекла,

$$Q_{ламп} = 1,96 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 3,92 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3\text{Па}/\text{с}$$

$$\begin{aligned} Q_{газ} &= Q_{обеч} + Q_{дниц1} + Q_{дниц2} + Q_{дниц3} + Q_{отр} + Q_{ламп} + Q_{констр} + Q_{кр.пан.} + \\ &+ Q_{штуц} = \\ &= 1507,2 \cdot 10^{-8} + 326,57 \cdot 10^{-8} + 376,8 \cdot 10^{-8} + 13,68 \cdot 10^{-8} + 376,8 \cdot 10^{-8} + 75,36 \cdot 10^{-8} + \end{aligned}$$

$$+1266,75 \cdot 10^{-8} + 14 \cdot 10^{-3} + 120 \cdot 10^{-8} + 3920 \cdot 10^{-8} = 1407976,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3\text{Па/с} \quad (15)$$

4) Расчет величины газового потока, через неплотности, в узлах соединения камеры, полагая число возможных мест натекания равным  $n=7$ . Проверка осуществляется масс–спектрометрическим течеискателем с чувствительностью  $\gamma = 7 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3\text{Па/с}$ .

$$Q_{\text{нат}} = n \cdot \gamma = 7 \cdot 7 \cdot 10^{-12} = 4,9 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3\text{Па/с} \quad (16)$$

Суммарный газовый поток равен:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{изд}} + Q_{\text{газ}} + Q_{\text{нат}} = 0,14 \cdot 10^{-6} + 1,408 \cdot 10^{-2} + 4,9 \cdot 10^{-11} = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3\text{Па/с} \quad (17)$$

## 2.2 Расчет вакуумной системы

### 2.2.1 Выбор вакуумной схемы

Исходные данные:

Суммарный газовый поток:  $Q = 1,41 \cdot 10^{-2} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па/с]}$ ;

Рабочее давление в вакуумной камере:  $P = 10^{-6} \text{ [Па]}$ ;

Предельное остаточное давление в камере:  $P = 10^{-8} \text{ [Па]}$ ;

Размеры откачиваемого объекта:  $D_0 = 20000 \text{ [мм]}$ ;

$L_0 = 30000 \text{ [мм]}$ .

Длины участков вакуумной системы:

$l_1 = 11500 \text{ [мм]}$ ;

$l_{21} = 8000 \text{ [мм]}$ ;

$l_{22} = 5000 \text{ [мм]}$ ;

$l_3 = 1000 \text{ [мм]}$ ;

$l_4 = 1000 \text{ [мм]}$ ;

$l_5 = 1000 \text{ [мм]}$ ;

$l_6 = 500 \text{ [мм]}$ ;

$l_7 = 1000 \text{ [мм]}$ .

На рисунке 6 изображена схема вакуумной системы.

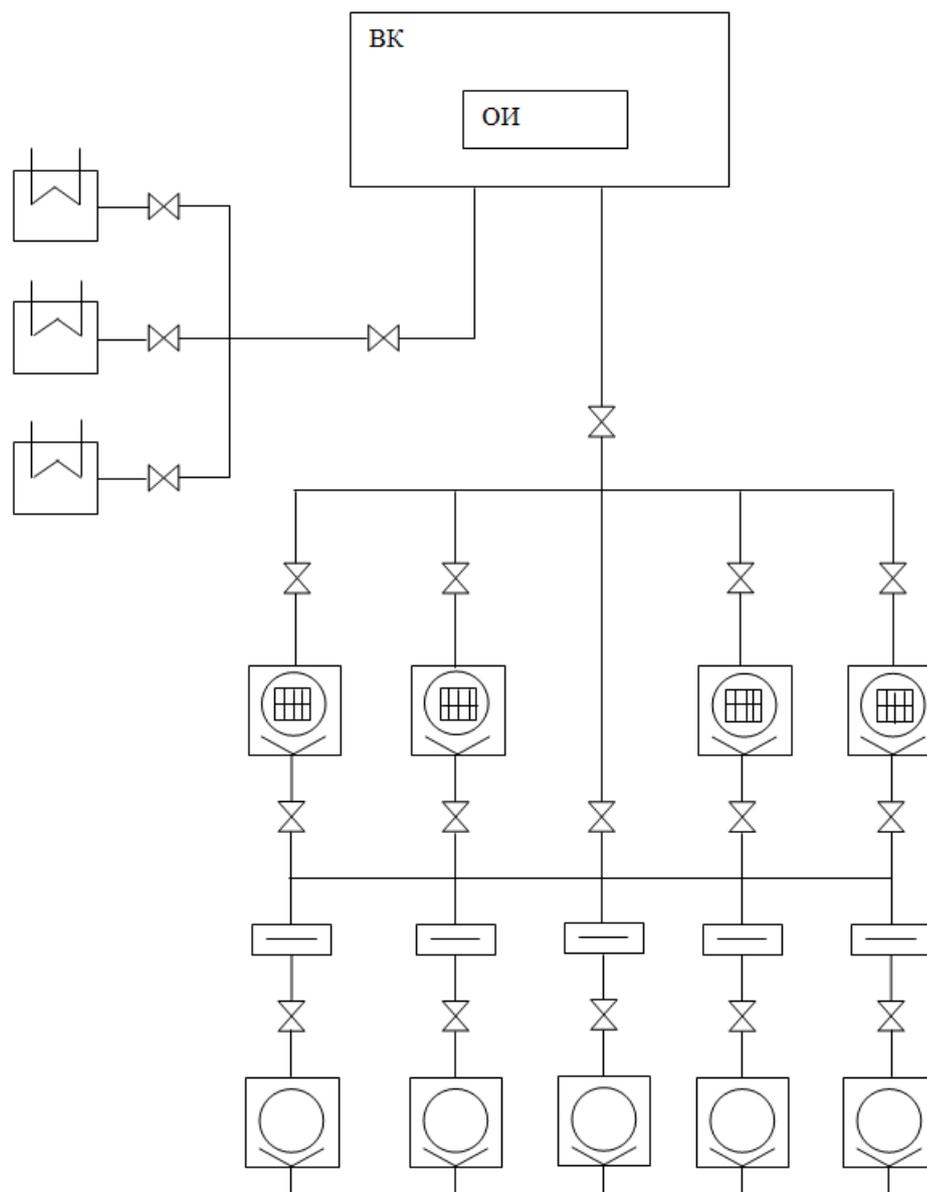


Рисунок 6 – Схема вакуумной системы

### 2.2.2 Выбор вакуумных насосов

#### 1) Выбор сверхвысоковакуумного насоса.

Эффективную быстроту откачки в откачиваемом объекте определяем по зависимости:

$$S_{эф1} = Q/p_1 = 1,41 \cdot 10^{-2} / 10^{-6} = 1,41 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с} \quad (18)$$

При  $n=5$  – число элементов в схеме между насосом и откачиваемым объектом, по графику оптимальное значение коэффициента использования  $K_{ul}=0,02$ .

На рисунке 7 изображен график оптимальных коэффициентов использования сверхвысоковакуумных насосов.

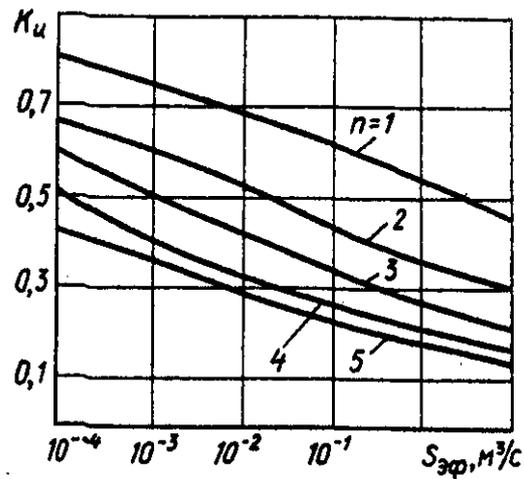


Рисунок 7 – Оптимальные коэффициенты использования сверхвысоковакуумных насосов

Определяем номинальную быстроту действия:

$$S_{m1} = Q / (K_{ul} \cdot p_1 - p_{np}) = 1,41 \cdot 10^{-2} / (0,02 \cdot 10^{-2} - 10^{-6}) = 70,85 \text{ м}^3/\text{с} \quad (19)$$

Выбираем ближайший по скорости действия криогенный насос HSR VELCO 900, имеющий следующие характеристики:

- а) Номинальная быстрота действия  $S_n = 36 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- б) Параметр запуска: 1500 мбар·л;
- в) Диаметр входного патрубка  $d = 900 \text{ мм}$ ;
- г) Время захлаживания  $t = 140 \text{ мин}$ .

Затем определяем необходимое количество насосов:

$$N = S_m / S_n = 70,85 / 36 = 1,97 = 2 \text{ шт.} \quad (20)$$

В состав вакуумной системы включаем два криогенных насоса и еще один дополнительный резервный насос.

Далее находим площадь поверхности криопанели:

а) Предельное давление насоса  $p_u$  определяем с помощью следующего уравнения:

$$p_u = 1/2 \cdot p \cdot (1 + (T_1/T_2)^{1/2}) \quad (21)$$

где  $p = 10^{-8}$  Па;

$T_1 = 20^\circ\text{C} = 293$  К;

$T_2 = -196^\circ\text{C} = 77$  К – температура кипения азота;

$$p_u = 1/2 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + (293/77)^{1/2}) = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ Па}$$

б) Коэффициент прилипания на криопанели связан с молекулярным весом соотношением:

$M = 29$  г/моль – молекулярная масса воздуха;

$$f = 0,453 + 0,256 \cdot \log_{10} M = 0,453 + 0,256 \cdot \log_{10} 29 = 0,83 \quad (22)$$

в) Вычислим коэффициент:

$$[(2g_c R_u \cdot T_1)/(3,14 \cdot M)]^{1/2} = [(2 \cdot 1 \cdot 8,314 \cdot 293)/(3,14 \cdot 29)]^{1/2} = 7,315 \text{ м/с} \quad (23)$$

г) Определяем параметр  $G$ :

$$G = (1-f) \cdot (T_1/T_2)^{1/2} \cdot [1 - p_u/p \cdot (1 - (T_2/T_1)^{1/2})] = (1-0,83) \cdot (293/77)^{1/2} \cdot [1 - 1,5 \cdot 10^{-8} / 10^{-8} \cdot (1 - (77/293)^{1/2})] = 0,16 \quad (24)$$

д) Находим удельную быстроту действия:

$$\frac{S_p}{A} = \frac{\sqrt{\frac{2g_c R_u T_1}{\pi M}} \cdot (1 - \frac{p_u}{p}) \cdot f}{1 + (\frac{p_u}{p}) \cdot (\sqrt{\frac{T_1}{T_2}} - 1) + G} = \frac{7,315 \cdot (1 - \frac{1,5 \cdot 10^{-8}}{10^{-6}}) \cdot 0,83}{1 + (\frac{1,5 \cdot 10^{-8}}{10^{-6}}) \cdot (\sqrt{\frac{293}{77}} - 1) + 0,16} = 5,09 \text{ м/с} \quad (25)$$

е) Необходимая площадь поверхности криопанели:

$$A = S_p / 5,09 = 70,85 / 5,09 = 13,89 \text{ м}^2 \quad (26)$$

Выбранная площадь криопанели  $S_{пан.} = 57 \text{ м}^2$  удовлетворяет требованиям по условиям задания.

2) Выбор высоковакуумного насоса.

Определяем эффективную быстроту откачки:

$$S_{эф2} = Q/p_2 = 1,41 \cdot 10^{-2} / 10^{-6} = 14100 \text{ м}^3/\text{с} \quad (27)$$

При  $n=5$  – число элементов в схеме между насосом и откачиваемым объектом, по графику оптимальное значение коэффициента использования  $K_{u2}=0,045$ .

На рисунке 8 изображен график оптимальных коэффициентов использования высоковакуумных насосов.

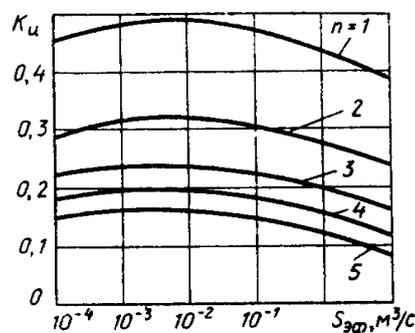


Рисунок 8 – Оптимальные коэффициенты использования высоковакуумных насосов

Определяем номинальную быстроту действия:

$$S_{m2} = Q / (K_{u2} \cdot p_2 - p_{np}) = 1,41 \cdot 10^{-2} / (0,045 \cdot 10^{-2} - 10^{-6}) = 31,2 \text{ м}^3/\text{с} \quad (28)$$

Выбираем ближайший по скорости действия турбомолекулярный насос ТМН-10000, имеющий следующие характеристики:

- а) Диапазон рабочих давлений  $P = 5 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-2}$  Па;
- б) Быстрота откачки при рабочих давлениях  $S_n = 11 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- в) Предельное остаточное давление  $P_{ост} = 10^{-7}$  Па;
- г) Наибольшее выпускное давление  $P = 10^0$  Па;
- д) Диаметр впускного патрубка  $d = 500$  мм;
- е) Диаметр выпускного патрубка  $d = 100$  мм;
- ж) Масса насоса – 3500 кг.

Определяем необходимое количество насосов:

$$N = S_m / S_n = 31,3 / 11 = 2,85 = 3 \text{ шт.} \quad (29)$$

В состав вакуумной системы включаем три турбомолекулярных насоса и еще один дополнительный резервный насос.

3) Выбор насоса для работы в области среднего и низкого вакуума.

Рабочее давление механического насоса выбираем по максимальному выпускному давлению турбомолекулярного насоса с коэффициентом запаса  $\varphi=2$ . Тогда  $p_3 = 10^0 / 2 = 5 \cdot 10^{-1}$  Па, что соответствует эффективной скорости откачки:

$$S_{эф3} = Q / p_3 = 1,41 \cdot 10^{-2} / 5 \cdot 10^{-1} = 2,82 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с} \quad (30)$$

При  $n=5$  – число элементов в схеме между насосом и откачиваемым объектом, по графику оптимальное значение коэффициента использования  $K_{u3}=0,85$ .

На рисунке 9 изображен график оптимальных коэффициентов использования низковакуумных насосов.

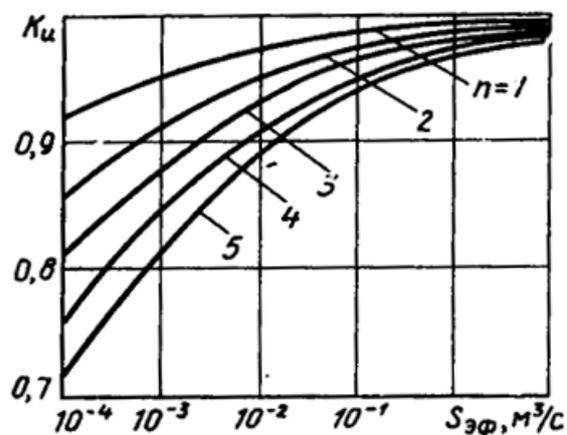


Рисунок 9 – Оптимальные коэффициенты использования низковакуумных насосов

Определяем номинальную быстроту действия:

$$S_{m3} = Q / (K_{u3} \cdot p_3 - p_{np}) = 1,41 \cdot 10^{-2} / (0,85 \cdot 10^{-2} - 10^{-3}) = 1,9 \text{ м}^3/\text{с} \quad (31)$$

Выбираем ближайший по скорости действия золотниковый насос НВЗ-500, имеющий следующие характеристики:

- а) Диапазон рабочих давлений  $P = 10^0 \dots 10^5$  Па;
- б) Быстрота откачки при рабочих давления  $S_n = 0,56 \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- в) Предельное остаточное давление  $P_{ост} = 10^0$  Па;
- ж) Масса насоса – 4000 кг.

Определяем необходимое количество насосов:

$$N = S_m / S_n = 1,9 / 0,56 = 3,5 = 4 \text{ шт.} \quad (32)$$

В состав вакуумной системы включаем четыре золотниковых насоса и еще один дополнительный резервный насос.

Проверим возможность использования механического насоса для предварительной откачки рабочей камеры, имеющей объем  $V = 8373 \text{ м}^3$ , за время  $t=16$  ч. Предварительная откачка должна идти до давления  $10^{-1}$  Па.

Учитывая, что откачка будет производиться четырьмя параллельно включенными насосами с быстродействием каждый  $0,56 \text{ м}^3/\text{с}$ , в расчетах их можно заменить эквивалентным насосом с быстродействием  $2,24 \text{ м}^3/\text{с}$ . Рассчитаем время предварительной откачки рабочей камеры. С учетом того, что для механических насосов коэффициент использования насоса  $\nu = 1,1 \div 1,25$ , получим:

$$S_0 = \frac{S_n}{\nu} = \frac{2,24}{1,1} = 2,04 \text{ [м}^3/\text{с]} \quad (33)$$

Тогда

$$t = \frac{V}{S_0} \cdot \ln \left( \frac{p_{\text{нач}} - Q_{\Sigma}' / S_0}{p - Q_{\Sigma}' / S_0} \right) \quad (34)$$

где  $p_{\text{нач}} = 10^5 \text{ [Па]}$  - начальное давление в сосуде;

$$t = \frac{8373}{2,04} \ln \frac{10^5 - \frac{1,41 \cdot 10^{-2}}{2,04}}{1 - \frac{1,41 \cdot 10^{-2}}{2,04}} = 56997,99 \text{ [с]} = 15 \text{ [ч]} 49 \text{ [мин]}$$

Таким образом, полученное время предварительной откачки меньше заданного времени, следовательно, удовлетворяет требованиям по условиям задания.

### 2.2.3 Определение конструктивных размеров трубопроводов и выбор элементов вакуумной системы

1) Сверхвысоковакуумная система.

На рисунке 10 изображена схема сверхвысоковакуумного участка.

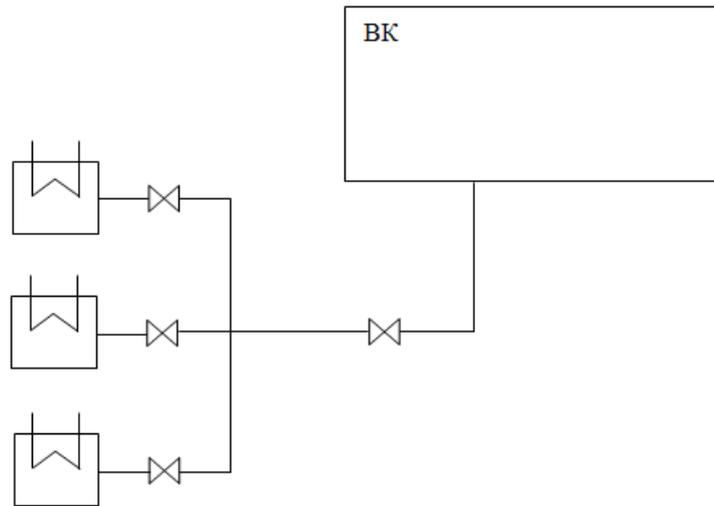


Рисунок 10 – Схема сверхвысоковакуумного участка

Определяем общую проводимость участка вакуумной системы от криогенных насосов до вакуумной камеры:

$$U_1 = S_{ml} \cdot K_{ul} / (1 - K_{ul}) = 70,85 \cdot 0,02 / (1 - 0,02) = 1,45 \text{ м}^3/\text{с} \quad (35)$$

Участок вакуумной системы состоит из пяти элементов. Будем считать в первом приближении, что все элементы имеют одинаковую проводимость, тогда:

$$U_{1j} = 5 \cdot U_1 = 5 \cdot 1,45 = 7,25 \text{ м}^3/\text{с} \quad (36)$$

Режим течения газа в трубопроводе определим по рабочему давлению  $p_1 = 10^{-6}$  Па и диаметру входного патрубка насоса  $d_{ex} = 0,9$  м. Критерий Кнудсена:

$$Kn = L_1 / p_1 \cdot d_{ex} = 7,5 \cdot 10^{-3} / 10^{-6} \cdot 0,9 = 8,33 \cdot 10^3 > 1,5 \quad (37)$$

т.е. режим течения молекулярный.

Диаметр первого элемента  $d_1 = 1$  м, длина  $L_1 = 13,5$  м, тогда проводимость первого трубопровода:

$$U_{11} = 121 \cdot d_1^3 / L_1 = 121 \cdot 1^3 / 13,5 = 8,963 \text{ м}^3/\text{с} \quad (38)$$

В качестве затвора выбираем ЗВЭ-1000 с диаметром условного прохода  $d_y = 1$  м и проводимостью в молекулярном режиме течения газа:

$$U_{12} = 242,2 \text{ м}^3/\text{с}$$

Диаметр третьего элемента  $d_3 = 1$  м, длина  $L_3 = 6$  м, диаметр коллектора  $d_k = 0,9$  м, длина – 3,5 м, тогда проводимость второго трубопровода:

$$U_{13}^1 = 38,1 \cdot d_3^3 / L_3 \cdot (T/M)^{1/2} = 38,1 \cdot 1^3 / 6 \cdot (293/29)^{1/2} = 20,184 \text{ м}^3/\text{с} \quad (39)$$

$$U_{13}^2 = 38,1 \cdot d_k^3 / L_k \cdot (T/M)^{1/2} = 38,1 \cdot 0,9^3 / 3,5 \cdot (293/29)^{1/2} = 25,224 \text{ м}^3/\text{с} \quad (40)$$

$$U_{13} = \frac{1}{\frac{1}{U_{13}^1} + \frac{1}{U_{13}^2}} = \frac{1}{\frac{1}{20,184} + \frac{1}{25,224}} = 11,22 \text{ м}^3/\text{с} \quad (41)$$

В качестве затвора выбираем ЗВЭ-800 с диаметром условного прохода  $d_y = 0,8$  м и проводимостью в молекулярном режиме течения газа  $U_{14} = 167,58 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Проводимость отверстия затвора равна:

$$S_{oms} = \pi R^2 = 3,14 \cdot 0,4^2 = 0,5024 \text{ м}^2 \quad (42)$$

$$U_{oms} = 36,4 \cdot S \cdot (T/M)^{1/2} = 36,4 \cdot 0,5024 \cdot (293/29)^{1/2} = 58,13 \text{ м}^3/\text{с} \quad (43)$$

Диаметр пятого элемента  $d_5 = 0,9$  м, длина  $L_5 = 1$  м, тогда проводимость третьего трубопровода:

$$U_{15} = 38,1 \cdot d_5^3 / L_5 \cdot (T/M)^{1/2} = 38,1 \cdot 0,9^3 / 1 \cdot (293/29)^{1/2} = 88,285 \text{ м}^3/\text{с} \quad (44)$$

Находим общую проводимость участка:

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{U_{11}} + \frac{1}{U_{12}} + \frac{1}{U_{13}} + \frac{1}{U_{14}} + \frac{1}{U_{15}}} = 4,94 \text{ м}^3/\text{с} \quad (45)$$

Общая проводимость выбранного участка 4,94 м<sup>3</sup>/с, что несколько меньше требуемой 7,25 м<sup>3</sup>/с.

Далее рассчитываем распределение давления по длине участка вакуумной системы от криогенных насосов до откачиваемого объекта.

а) Определяем давление во входном сечении насоса:

$$P_{н1} = p_{нп1} + Q/S_{м1} = 10^{-8} + 1,41 \cdot 10^{-2} / 36 = 3,92 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \quad (46)$$

б) Перепад давления по длине трубопровода, элемента 5:

$$\Delta p_5 = Q/U_{15} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 88,285 = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \quad (47)$$

в) Перепад давления во входном отверстии ЗВЭ-800 и по длине, элемента 4:

$$\Delta p_{омс} = Q/U_{омс} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 58,13 = 2,43 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \quad (48)$$

$$\Delta p_4 = Q/U_{14} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 167,58 = 0,84 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \quad (49)$$

г) Перепад давления по длине трубопровода, элемента 3:

$$\Delta p_3 = Q/U_{13} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 11,22 = 12,57 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \quad (50)$$

д) Перепад давления по длине ЗВЭ-1000, элемента 2:

$$\Delta p_2 = Q/U_{12} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 242,2 = 0,58 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \quad (51)$$

е) Перепад давления по длине трубопровода, элемента 1:

$$\Delta p_1 = Q/U_{11} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 8,963 = 15,73 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \quad (52)$$

В таблице 1 указаны распределение давления на участке.

Таблица 1 - Распределение давления на участке вакуумной системы от криогенного насоса до откачиваемого объекта

Название элемента	Проводимость м <sup>3</sup> /с	Перепад давления, Па	Давление на входе, Па	Давление на выходе, Па
Элемент 5 (тр. 3)	88,285	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$5,52 \cdot 10^{-4}$	$3,92 \cdot 10^{-4}$
ЗВЭ-800 (вх. отв.)	58,13	$2,43 \cdot 10^{-4}$	$7,95 \cdot 10^{-4}$	$5,52 \cdot 10^{-4}$
ЗВЭ-800 (по длине)	167,58	$0,84 \cdot 10^{-4}$	$8,79 \cdot 10^{-4}$	$7,95 \cdot 10^{-4}$
Элемент 3 (тр. 2)	11,22	$12,57 \cdot 10^{-4}$	$21,46 \cdot 10^{-4}$	$8,79 \cdot 10^{-4}$
ЗВЭ-1000	242,2	$0,58 \cdot 10^{-4}$	$22,04 \cdot 10^{-4}$	$21,46 \cdot 10^{-4}$
Элемент 1 (тр. 1)	8,963	$15,73 \cdot 10^{-4}$	$37,77 \cdot 10^{-4}$	$22,04 \cdot 10^{-4}$

2) Высоковакуумная система.

На рисунке 11 изображена схема высоковакуумного участка.

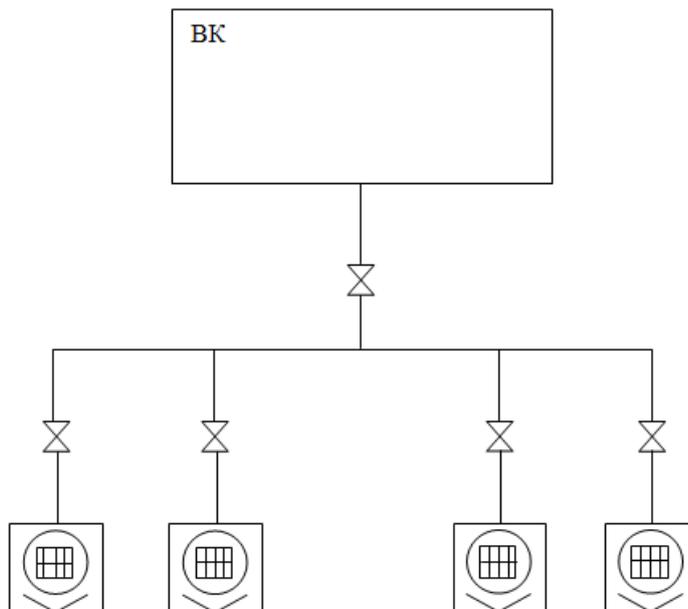


Рисунок 11 – Схема высоковакуумного участка

Определяем общую проводимость участка вакуумной системы от турбомолекулярных насосов до вакуумной камеры:

$$U_2 = S_{m2} \cdot K_{u2} / (1 - K_{u2}) = 11 \cdot 0,045 / (1 - 0,045) = 0,52 \text{ м}^3/\text{с} \quad (53)$$

Участок вакуумной системы состоит из пяти элементов. Будем считать в первом приближении, что все элементы имеют одинаковую проводимость, тогда:

$$U_{2j} = 5 \cdot U_2 = 5 \cdot 0,52 = 2,6 \text{ м}^3/\text{с} \quad (54)$$

Режим течения газа в трубопроводе определим по рабочему давлению  $p_2=10^{-2}$  Па и диаметру входного патрубка насоса  $d_{ex} = 0,5$  м. Критерий Кнудсена:

$$Kn = L_1/p_2 \cdot d_{ex} = 7,5 \cdot 10^{-3} / 10^{-2} \cdot 0,5 = 1,55 > 1,5 \quad (55)$$

т.е. режим течения молекулярный.

Диаметр первого элемента  $d_1 = 1$  м, длина  $L_1 = 11,5$  м, тогда проводимость первого трубопровода:

$$U_{21} = 121 \cdot d_1^3 / L_1 = 121 \cdot 1^3 / 11,5 = 10,5 \text{ м}^3/\text{с} \quad (56)$$

В качестве затвора выбираем ЗВЭ-1000 с диаметром условного прохода  $d_y = 1$  м и проводимостью в молекулярном режиме течения газа:

$$U_{22} = 242,2 \text{ м}^3/\text{с}$$

Диаметр третьего элемента  $d_3 = 1$  м, длина  $L_3 = 8$  м, диаметр коллектора  $d_k = 0,5$  м, длина – 5 м и 2 м, тогда проводимость второго трубопровода:

$$U_{23}^1 = 38,1 \cdot d_3^3 / L_3 \cdot (T/M)^{1/2} = 38,1 \cdot 1^3 / 8 \cdot (293/29)^{1/2} = 15,14 \text{ м}^3/\text{с} \quad (57)$$

$$U_{23}^{21} = 38,1 \cdot d_k^3 / L_k \cdot (T/M)^{1/2} = 38,1 \cdot 0,5^3 / 5 \cdot (293/29)^{1/2} = 3,03 \text{ м}^3/\text{с} \quad (58)$$

$$U_{23}^{22} = 38,1 \cdot d_k^3 / L_k \cdot (T/M)^{1/2} = 38,1 \cdot 0,5^3 / 2 \cdot (293/29)^{1/2} = 7,57 \text{ м}^3/\text{с} \quad (59)$$

$$U_{23}^2 = U_{23}^{21} + U_{23}^{22} \cdot 2 = 3,03 + 7,57 \cdot 2 = 18,17 \text{ м}^3/\text{с} \quad (60)$$

$$U_{23} = \frac{1}{\frac{1}{U_{23}^1} + \frac{1}{U_{23}^2}} = \frac{1}{\frac{1}{15,14} + \frac{1}{18,17}} = 8,26 \text{ м}^3/\text{с} \quad (61)$$

В качестве затвора выбираем ЗВЭ-500 с диаметром условного прохода  $d_y = 0,5$  м и проводимостью в молекулярном режиме течения газа  $U_{24} = 68,81 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Диаметр пятого элемента  $d_5 = 0,5$  м, длина  $L_5 = 1$  м, тогда проводимость третьего трубопровода:

$$U_{25} = 38,1 \cdot d_5^3 / L_5 (T/M)^{1/2} = 38,1 \cdot 0,5^3 / 1 \cdot (293/29)^{1/2} = 15,4 \cdot 3 = 45,42 \text{ м}^3/\text{с} \quad (62)$$

Находим общую проводимость участка:

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{U_{21}} + \frac{1}{U_{22}} + \frac{1}{U_{23}} + \frac{1}{U_{24}} + \frac{1}{U_{25}}} = 3,896 \text{ м}^3/\text{с} \quad (63)$$

Общая проводимость выбранного участка 3,896 м<sup>3</sup>/с, что несколько больше требуемой 2,6 м<sup>3</sup>/с.

Далее рассчитываем распределение давления по длине участка вакуумной системы от криогенных насосов до откачиваемого объекта.

а) Определяем давление во входном сечении насоса:

$$P_{н2} = p_{нр2} + Q/S_{m2} = 10^{-6} + 1,41 \cdot 10^{-2} / 11 = 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (64)$$

б) Перепад давления по длине трубопровода, элемента 5:

$$\Delta p_5 = Q/U_{25} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 45,42 = 0,31 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (65)$$

в) Перепад давления по длине ЗВЭ-500, элемента 4:

$$\Delta p_4 = Q/U_{24} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 68,81 = 0,205 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (66)$$

г) Перепад давления по длине трубопровода, элемента 3:

$$\Delta p_3 = Q/U_{23} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 8,26 = 1,71 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (67)$$

д) Перепад давления по длине ЗВЭ-1000, элемента 2:

$$\Delta p_2 = Q/U_{22} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 242,2 = 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (68)$$

е) Перепад давления по длине трубопровода, элемента 1:

$$\Delta p_1 = Q/U_{21} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 10,5 = 1,34 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (69)$$

В таблице 2 указаны распределение давления на участке.

Таблица 2 - Распределение давления на участке вакуумной системы от турбомолекулярного насоса до откачиваемого объекта

Название элемента	Проводимость м <sup>3</sup> /с	Перепад давления, Па	Давление на входе, Па	Давление на выходе, Па
Элемент 5 (тр. 3)	45,2	$0,31 \cdot 10^{-3}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$
ЗВЭ-500	68,81	$0,205 \cdot 10^{-3}$	$1,795 \cdot 10^{-3}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$
Элемент 3 (тр. 2)	8,26	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$2,505 \cdot 10^{-3}$	$1,795 \cdot 10^{-3}$
ЗВЭ-1000	242,2	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$8,305 \cdot 10^{-3}$	$2,505 \cdot 10^{-3}$
Элемент 1 (тр. 1)	10,5	$1,34 \cdot 10^{-3}$	$9,645 \cdot 10^{-3}$	$8,305 \cdot 10^{-3}$

2) Низковакуумная система.

Определяем общую проводимость участка вакуумной системы от золотниковых насосов до турбомолекулярных насосов:

$$U_3 = S_{m3} \cdot K_{u3} / (1 - K_{u3}) = 0,56 \cdot 0,85 / (1 - 0,85) = 3,17 \text{ м}^3/\text{с} \quad (70)$$

Участок вакуумной системы состоит из семи элементов. Будем считать в первом приближении, что все элементы имеют одинаковую проводимость, тогда:

$$U_{3j} = 7 \cdot U_3 = 7 \cdot 3,17 = 22,19 \text{ м}^3/\text{с} \quad (71)$$

Режим течения газа в трубопроводе определим по рабочему давлению  $p_3 = 10^{-1}$  Па и диаметру входного патрубка насоса  $d_{ex} = 0,1$  м. Критерий Кнудсе-

на:

$$Kn = L_1/p_2 \cdot d_{ex} = 7,5 \cdot 10^{-3} / 10^{-1} \cdot 0,1 = 7,5 > 1,5 \quad (72)$$

т.е. режим течения молекулярный.

Определяем проводимость отверстия выпускного патрубка ТМН-10000, диаметр которого  $d_{омв} = 0,1$  м:

$$S_{омв} = \pi R^2 = 3,14 \cdot 0,05^2 = 0,00785 \text{ м}^2 \quad (73)$$

$$U_{омв} = 36,4 \cdot S \cdot (T/M)^{1/2} = 36,4 \cdot 0,00785 \cdot (293/29)^{1/2} = 0,91 \text{ м}^3/\text{с} \quad (74)$$

Диаметр первого элемента  $d_1 = 0,4$  м, длина  $L_1 = 1$  м, тогда проводимость первого трубопровода:

$$U_{31} = 38,1 \cdot d_1^3 / L_1 (T/M)^{1/2} = 38,1 \cdot 0,4^3 / 1 \cdot (293/29)^{1/2} = 7,75 \cdot 4 = 23,25 \text{ м}^3/\text{с} \quad (75)$$

В качестве затвора выбираем ЗВЭ-400 с диаметром условного прохода  $d_y = 0,4$  м и проводимостью в молекулярном режиме течения газа:

$$U_{32} = 46,25 \text{ м}^3/\text{с}$$

Диаметр третьего элемента  $d_3 = 0,4$  м, длина  $L_3 = 1$  м, тогда проводимость второго трубопровода:

$$U_{33} = 38,1 \cdot d_3^3 / L_3 (T/M)^{1/2} = 38,1 \cdot 0,4^3 / 1 \cdot (293/29)^{1/2} = 7,75 \cdot 4 = 23,25 \text{ м}^3/\text{с} \quad (76)$$

В качестве ловушки выбираем ЛА-400 с диаметром условного прохода  $d_y = 0,4$  м и проводимостью в молекулярном режиме течения газа  $U_{34} = 23,5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Диаметр пятого элемента  $d_5 = 0,4$  м, длина  $L_5 = 0,5$  м, тогда проводимость третьего трубопровода:

$$U_{35}=38,1 \cdot d_5^3/L_5(T/M)^{1/2}=38,1 \cdot 0,4^3/0,5 \cdot (293/29)^{1/2}=15,5 \cdot 3=46,5 \text{ м}^3/\text{с} \quad (77)$$

В качестве затвора выбираем ЗВЭ-400 с диаметром условного прохода  $d_y=0,4$  м и проводимостью в молекулярном режиме течения газа:

$$U_{36} = 46,25 \text{ м}^3/\text{с}$$

Диаметр седьмого элемента  $d_7 = 0,4$  м, длина  $L_7 = 1$  м, тогда проводимость четвертого трубопровода:

$$U_{37}=38,1 \cdot d_7^3/L_7(T/M)^{1/2}=38,1 \cdot 0,4^3/1 \cdot (293/29)^{1/2}=7,75 \cdot 4=23,25 \text{ м}^3/\text{с} \quad (78)$$

Находим общую проводимость участка:

$$U_3 = \frac{1}{\frac{1}{U_{31}} + \frac{1}{U_{32}} + \frac{1}{U_{33}} + \frac{1}{U_{34}} + \frac{1}{U_{35}} + \frac{1}{U_{36}} + \frac{1}{U_{37}}} = 20,63 \text{ м}^3/\text{с} \quad (79)$$

Общая проводимость выбранного участка  $20,63 \text{ м}^3/\text{с}$ , что несколько меньше требуемой  $22,19 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Далее рассчитываем распределение давления по длине участка вакуумной системы от золотниковых насосов до турбомолекулярных насосов.

а) Определяем давление во входном сечении насоса НВЗ-500:

$$P_{нз} = p_{нрз} + Q/S_{мз} = 10^{-1} + 1,41 \cdot 10^{-2}/0,56 = 2,62 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \quad (80)$$

б) Перепад давления по длине трубопровода, элемента 7:

$$\Delta p_7 = Q/U_{37} = 1,41 \cdot 10^{-2}/23,25 = 0,61 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (81)$$

в) Перепад давления по длине ЗВЭ-400, элемента 6:

$$\Delta p_6 = Q/U_{36} = 1,41 \cdot 10^{-2}/46,25 = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (82)$$

г) Перепад давления по длине трубопровода, элемента 5:

$$\Delta p_5 = Q/U_{35} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 46,5 = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (83)$$

д) Перепад давления по длине ловушки ЛА-400, элемента 4:

$$\Delta p_4 = Q/U_{34} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 23,5 = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (84)$$

е) Перепад давления по длине трубопровода, элемента 3:

$$\Delta p_3 = Q/U_{33} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 23,25 = 0,61 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (85)$$

ж) Перепад давления по длине ЗВЭ-400, элемента 2:

$$\Delta p_2 = Q/U_{32} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 46,25 = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (86)$$

з) Перепад давления по длине трубопровода, элемента 1:

$$\Delta p_1 = Q/U_{31} = 1,41 \cdot 10^{-2} / 23,25 = 0,61 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (87)$$

В таблице 3 указаны распределение давления на участке.

Таблица 3 - Распределение давления на участке

Название элемента	Проводимость м <sup>3</sup> /с	Перепад давления, Па	Давление на входе, Па	Давление на выходе, Па
Элемент 7 (тр. 4)	23,25	$0,61 \cdot 10^{-3}$	$2,681 \cdot 10^{-2}$	$2,62 \cdot 10^{-2}$
ЗВЭ-400	46,25	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$2,711 \cdot 10^{-2}$	$2,681 \cdot 10^{-2}$
Элемент 5 (тр. 3)	46,5	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$2,741 \cdot 10^{-2}$	$2,711 \cdot 10^{-2}$
ЛА-400	23,5	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$2,801 \cdot 10^{-2}$	$2,741 \cdot 10^{-2}$
Элемент 3 (тр. 2)	23,25	$0,61 \cdot 10^{-3}$	$2,862 \cdot 10^{-2}$	$2,801 \cdot 10^{-2}$
ЗВЭ-400	46,25	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$2,892 \cdot 10^{-2}$	$2,862 \cdot 10^{-2}$
Элемент 1 (тр. 1)	23,25	$0,61 \cdot 10^{-3}$	$2,953 \cdot 10^{-2}$	$2,892 \cdot 10^{-2}$

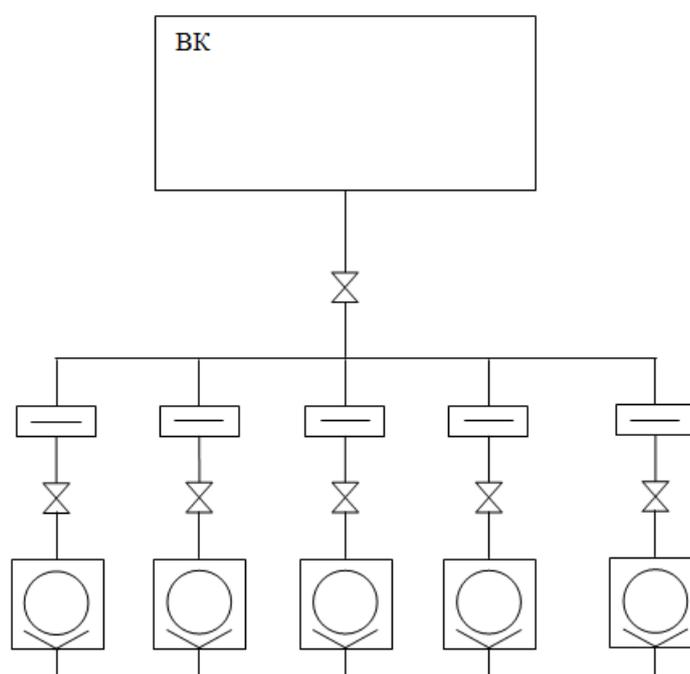


Рисунок 12 – Схема низковакуумного участка

Вывод по разделу: в рамках данного раздела был проведен расчет газовых нагрузок, расчет вакуумной системы, включающий в себя выбор вакуумной схемы, выбор вакуумных насосов, так же были определены конструктивные размеры трубопроводов, проведен выбор элементов вакуумной системы.

## 3 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

### 3.1 Общая структура

Вакуумная установка представляет собой взаимосвязанные по техническому циклу составные части, обеспечивающие проведение испытаний изделий.

Рабочее давление в камере достигается с помощью системы вакуумирования, состоящей из форвакуумной, высоковакуумной сверхвысоковакуумной систем. Предварительная откачка камеры до давления  $1 \cdot 10^{-1}$  Па производится форвакуумной системой откачки с использованием четырех золотниковых насосов типа НВЗ-500. Далее камера откачивается высоковакуумным турбомолекулярным насосом ТМН-10000. Предельное давление в камере  $10^{-8}$  Па достигается криогенным насосом HSR VELCO 900.

Зарядка изделия в камере гелием, азотом, воздухом производится системой зарядки сжатыми газами.

Работа систем вакуумирования, газоснабжения и разгерметизации обеспечивается системой управления, измерения и контроля (СУИК) дистанционно с пульта управления установкой. СУИК обеспечивает необходимые блокировки и подачу сигналов при возникновении аварийных ситуаций.

Вакуумная установка состоит из следующих составных частей:

- 1) Вакуумная камера;
- 2) Система вакуумирования;
- 3) Система газоснабжения;
- 4) Система разгерметизации;
- 5) Система управления, измерения и контроля.

#### 3.1.1 Вакуумная камера

Камера вакуумная (в дальнейшем – камера) предназначена для размещения в ней испытываемого изделия и проведения вакуумных испытаний.

Корпус камеры состоит из вертикально расположенной цилиндрической обечайки диаметром 20000 мм, эллиптических верхнего и нижнего днищ

диаметром 20000 мм, фланца и уплотнения верхнего днища, опорных лап. Материал эллиптической днищ и обечайки – сталь марки 08X18H10T толщиной 67 мм.

С наружной стороны цилиндрическая часть камеры подкреплена четырьмя кольцами жесткости П-образного типа для устойчивости от атмосферного давления. Кольца жесткости выполнены из стали марки 08X18H10T, высотой 200 мм, ширина приварного участка 500 мм.

Эллиптическое верхнее днище, высота которого 5000 мм выполнено из стали 08X18H10T и приваривается к фланцу. К нижнему опорному фланцу снизу приварено кольцо с проточкой типа «шип-паз», в которую вставляется резиновый уплотнитель сечением 140×290 мм. Днище крепится на обечайку 120 болтами с диаметром 159 мм.

Эллиптическое нижнее днище, высота которого 5000 мм тоже выполнено из стали 08X18H10T и приваривается к обечайке.

Внизу эллиптического днища установлены 4 опорные стойки, высотой 3000 мм и диаметром окружности 2500 мм.

По бокам цилиндрической обечайки расположено два штуцера. Первый диаметром 10000 мм и длиной 8000 мм, второй диаметром 3000 мм и длиной 2500 мм, первый штуцер закрывается эллиптической крышкой, второй – конической полой крышкой, которые крепятся на болты. Штуцер большего диаметра пред- назначен для горизонтальной загрузки испытуемого объекта, штуцер меньшего диаметра представляет собой шлюз – для технического персонала.

Также по бокам обечайки расположено 4 штуцера, два диаметром 1000 мм и два диаметром 200 мм, ко всем штуцерам присоединены отводы соответствующих диаметров.

В нижней части камеры смонтирована поворотная платформа с ложемен- тами, которая подкрепляется внутренними кольцами жесткости. Платформа имеет электропривод, для обеспечения вращения объекта испытания по оси У. Изделие опускается внутрь камеры через верхнее загрузочное устройство или

въезжает на тележке по направляющим через фронтальное загрузочное устройство, перед началом вакуумных испытаний. На тележке установлены кольца, с помощью которых фиксируется объект испытаний. Кольца также имеют электропривод для вращения ОИ по оси X, для поворота объекта по отношению к имитатору солнечного излучения (рисунок 13).

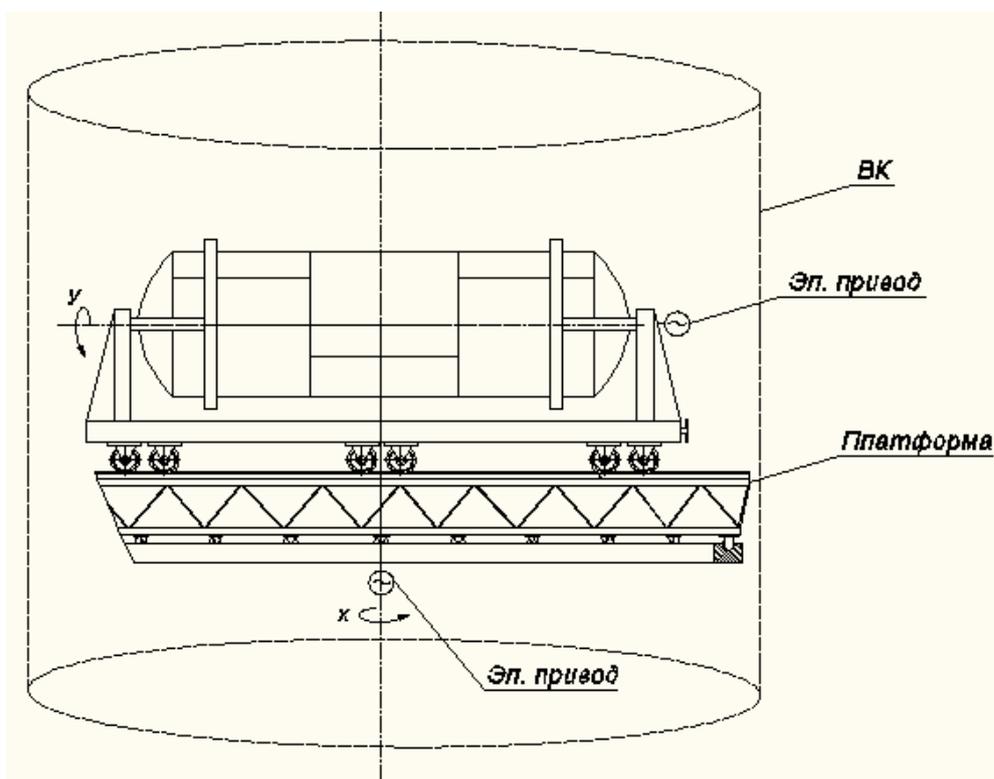


Рисунок 13 – Установка ОИ на тележке и поворотной платформе

В камере установлены криопанели, на них конденсируются остаточные газы кроме Ne, N<sub>2</sub> и He. Панели обеспечивают высокую быстроту откачки и состав остаточного газа, приближающийся к таковому в космосе. Внутри данных панелей протекает жидкий азот с температурой  $T \approx 77$  К, предназначенный для их охлаждения.

Система имитации солнечного излучения предназначена для испытания объекта на воздействие солнечной радиации и теплового потока. В качестве имитатора применяются керамические нагреватели инфракрасного излучения в количестве 100 шт.

Техническая характеристика:

- мощность:  $W = 1000$  [Вт];
- максимальная температура спирали:  $T_{\text{макс}} = 2520^{\circ}\text{C}$ ;
- максимальная температура нагреваемой области:  $700^{\circ}\text{C}$ .

Керамические нагреватели инфракрасного излучения передают энергию электромагнитными волнами. Спектр этого излучения простирается снаружи освещения, видимого человеческим глазом в диапазоне длины волны от  $0,7$  [м] до  $80$  [м]. Передача энергии не требует излучения среды и поэтому также возможна в вакууме.

Керамические инфракрасные лампы с отражателем из полированного алюминия со стандартным цоколем. Инфракрасные лампы легко и безопасно монтируются. Благодаря своему простому соединению инфракрасные лампы применимы для отдельных процессов и для скомпонованных групп нагревателей.

Вакуумно-плотные электрические вводы дают возможность для подключения силовых линий  $0,4$  кВ, специальных токов и до  $100$  каналов контрольных параметров ОИ.

### **3.1.2 Система откачки**

Система откачки состоит из системы форвакуумной откачки — золотниковые насосы, системы высоковакуумной откачки — турбомолекулярные насосы и системы сверхвысоковакуумной откачки — криогенные насосы, трубопроводов, ловушек, запорно-регулирующей арматуры, контрольно-измерительных приборов и системы автоматики.

#### **3.1.2.1 Золотниковый насос**

Золотниковые вакуумные насосы применяют для откачивания воздуха, неагрессивных газов, паров и парогазовых смесей, предварительно очищенных от механических загрязнений. Предельное остаточное давление, создаваемое насосами  $1 \dots 0,1$  Па.

Золотниковые насосы, выпускаемые в одно или двухступенчатом исполнении, используют в качестве форвакуумных для высоковакуумных

насосов различного типа или насосов предварительного разряжения, предназначенных для понижения давления в откачиваемом объеме от атмосферного до значения давления запуска  $P_{зан.}$ , при котором начинает работу другой вакуумный насос или система насосов.

Вакуумный насос НВЗ–500 состоит из собственно насоса, двигателя, клиноременной передачи и маслобака. Насос состоит из корпуса, в котором выполнены роторные камеры и масляная камера, а также каналов подвода и отвода рабочей среды. В роторных камерах на эксцентриковом валу установлены плунжеры, хвостовики которых размещены в направляющих.

Положительные качества золотниковых вакуумных насосов состоят в высокой надежности, простоте обслуживания и практически мало меняющейся скорости действия в широком диапазоне давлений.

Насос НВЗ-500 имеет следующие характеристики:

- номинальная скорость действия:  $S_H = 0,56$  [м<sup>3</sup>/с];
- предельное остаточное давление:  $P_{ост} = 1$  [Па];
- мощность двигателя:  $N_{дв} = 55$  [кВт];
- Масса:  $m = 4000$  [кг].

На рисунке 14 изображена схема золотникового насоса.

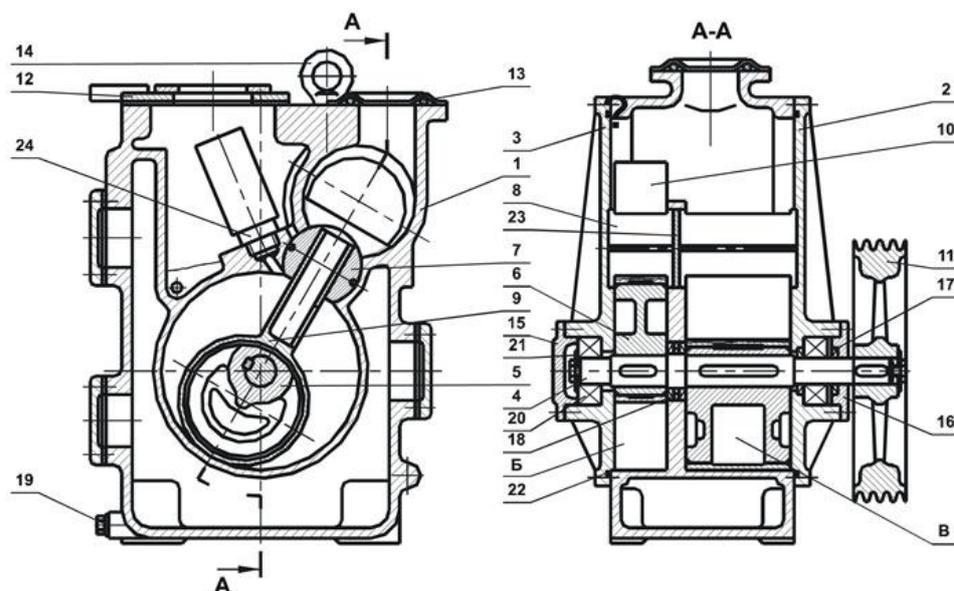


Рисунок 14 – Схема золотникового насоса

1 – корпус, 2 и 3 – крышки передняя и задняя, 4 – вал, 5 и 6 – эксцентрики, 7 и 8 – направляющие, 9 и 10 – плунжеры, 11 – маховик, 12, 15, 16 – крышки, 13 – кольцо, 14 – рым-болт, 17 и 18 – манжеты, 19 – пробка, 20 – подшипник, 21 – шайба, 22 – кольцо, 23 – перегородка, 24 – клапан, Б и В – роторные камеры.

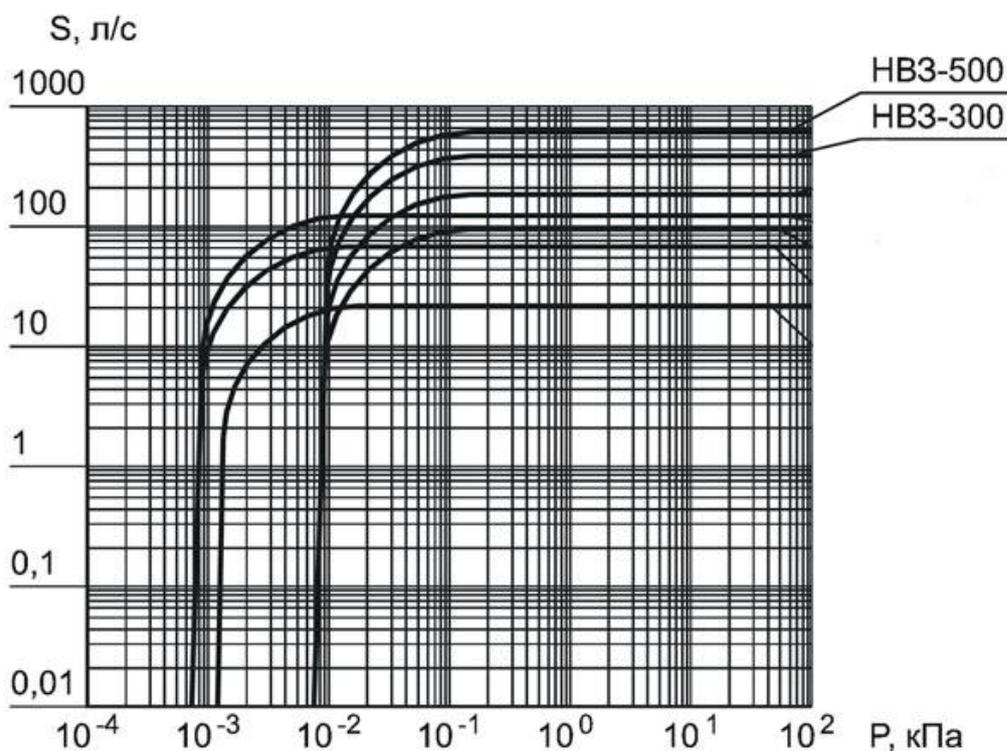


Рисунок 15 – Зависимость быстроты действия насосов от входного давления

### 3.1.2.2 Турбомолекулярный насос

В турбомолекулярном насосе процесс откачки основан на принципе сообщения молекулам газа направленного движения в сторону предварительного разрежения за счет быстро движущихся поверхностей.

Двухпоточный насос, отличающийся развитой всасывающей полостью большой проводимости, установлен на основании 7 с помощью четырех амортизаторов 6. Проточная часть насоса состоит из чередующихся между собой роторных и статорных колес дискового типа. Роторные колеса напрессованы на вал, который вращается на двух шарикоподшипниках, имеющих текстолитовые сепараторы. Шарикоподшипники в сборе со сферическими кольцами смонтированы на специальных упругих металлических рессорах.

В форвакуумную полость насоса с левой стороны встроен электродвигатель, ротор которого расположен консольно на валу ротора.

Гидрореле 4 предназначено для контроля давления воды в системе охлаждения шарикоподшипников и электродвигателя насоса. При падении давления воды в системе охлаждения ниже 50 кПа гидрореле отключает питание электродвигателя насоса.

Масляный насос 5 шнекового типа, снабженный самостоятельным двигателем, подает смазочный материал к подшипникам. Насос снабжен осушителем 2 с системой напуска осушенного воздуха через клапан 3 во всасывающую полость насоса при его остановках для предотвращения проникновения паров масла из форвакуумного насоса.

Основные характеристики турбомолекулярного насоса ТМН-10000:

- диапазон рабочих давлений  $P_{раб} = 5 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-2}$  Па;
- номинальная быстрота действия  $S_H = 11$  [м<sup>3</sup>/с];
- диаметр входного патрубка  $d_{вх} = 500$  [мм];
- диаметр выходного патрубка  $d_{вых} = 500$  [мм];
- предельное давление  $P_{пр} = 10^{-7}$  [Па];
- наибольшее выпускное давление  $P = 10^0$  [Па];

На рисунке 16 изображен турбомолекулярный насос.

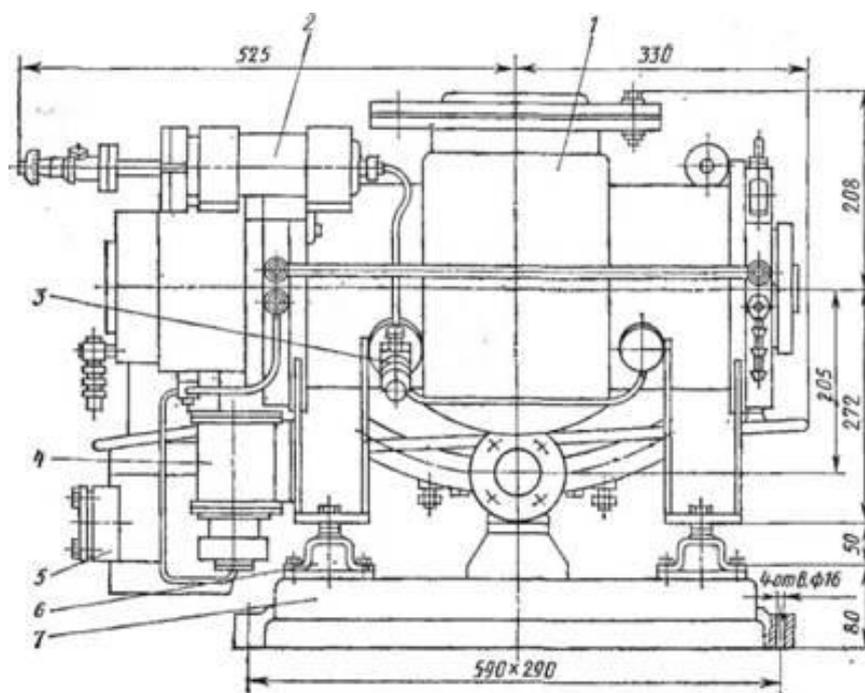


Рисунок 16 – Турбомолекулярный насос ТМН-10000.

### 3.1.2.3 Криогенный насос

Принципиально конструкция криогенного насоса довольно проста. Это сосуд с большим отношением поверхности к объему и двойными стенками, между которыми находится криогенная жидкость, или простым жестяным кожухом с напаянным змеевиком, через который протекает криогенная жидкость. Эта жидкость по мере испарения непрерывно пополняется. С целью уменьшения скорости испарения криоагента (вследствие нагревания поверхности сосуда, в котором он заключен, от излучения окружающей среды) применяются охлаждающие экраны, обладающие промежуточной температурой между криогенным сосудом и окружающей средой.

Так, например, сосуд с жидким гелием (при температуре 4 К) помещается в азот (при температуре 77 К). Обычно пары гелия (ввиду его высокой цены) собирают в резервуары, а затем сжимают и конденсируют. Таким образом, жидкий гелий почти целиком восстанавливается, большие его потери имеют место лишь вследствие утечек. В этих условиях расход гелия значительно уменьшается по сравнению со случаем, когда сосуд, в котором содержится ге-

лий, находится непосредственно под воздействием окружающей среды (с температурой  $\sim 300$  К). Очевидно, что обе поверхности двухоболочного сосуда действуют как насосы: газы, легко конденсирующиеся, оседают на обеих поверхностях, а газы, трудно конденсирующиеся, — на поверхности сосуда с гелием. Отсюда следует, что сначала нужно включать азотный насос, а затем гелиевый.

На рисунке 5 представлена схема криогенного гелиевого насоса, у которого резервуар жидкого гелия снабжен внешней оболочкой 2 из гофрированной жести. Эта оболочка посредством цилиндра 3 соединена с резервуаром жидкого азота 4. Как оболочка гелиевого резервуара, так и цилиндр изготовлены из металла, обладающего высокой теплопроводностью. Резервуар с азотом также имеет рубашку, переходящую во фланец 5, который служит для фиксации криогенного насоса в отверстии вакуумируемой системы.

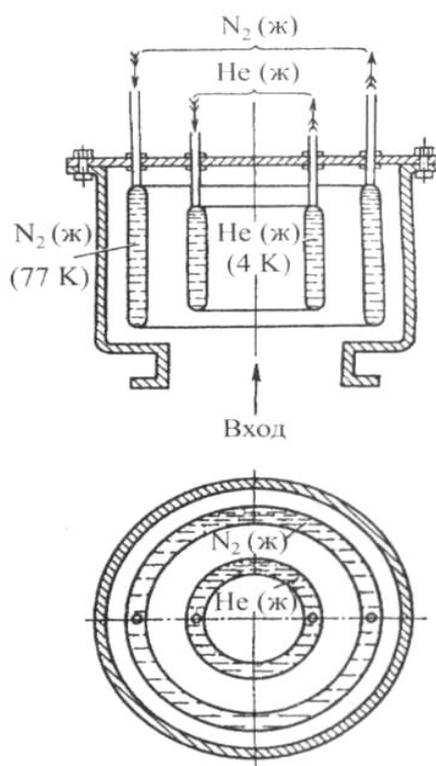


Рисунок 17 – Схема криогенного гелиевого насоса с экраном на жидком азоте

Основные характеристики криогенного насоса HSR VELCO 900:

- номинальная быстрота действия:  $S_H = 36$  [м<sup>3</sup>/с];
- диаметр входного патрубка:  $d_{вх} = 900$  [мм];
- предельное давление:  $P_{пр} = 1,5 \cdot 10^{-8}$  [Па];
- параметр запуска: 1500 [мбар\*л];
- время захолаживания:  $t = 140$  мин;
- масса: 260 [кг].

На рисунке 18 изображен криогенный насос HSR VELCO 900.



Рисунок 18 – Криогенный насос HSR VELCO 900

#### **3.1.2.4 Форвакуумная азотная ловушка**

Принцип действия низкотемпературных форвакуумных ловушек основан на конденсации паров масла и продуктов его разложения на поверхностях ловушек, охлажденных до низких температур. Ловушки устанавливают на впускном патрубке форвакуумного насоса. Азотная форвакуумная ловушка (ЛФА), охлаждаемая жидким азотом, представляет собой трубу 11 со встроенным

защитным экраном 12, помещенную в сосуд Дьюара 4. Труба 11 для откачиваемого газа, имеющая на концах фланцы 1 и 9 для крепления ловушки в форвакуумном трубопроводе, установлена с зазором в горловине 3 и в нижней части герметично соединена с внутренней стенкой 5 сосуда Дьюара, а через переходник 8 - с его наружной стенкой. Переходник 8 предназначен для уменьшения теплопритока по трубе 11. Откачку сосуда Дьюара выполняют через штуцер 10. Вакуум в этом сосуде поддерживается сорбентом 6 (активированный уголь), который размещен на сетке 7. Жидкий азот заливают в ловушку через трубку 2. Патрубок 13 предназначен для выхода паров жидкого азота. Пары масла и продукты его разложения конденсируются на внутренней поверхности грубы 11 и экрана 12. Ловушка ЛА эффективно поглощает также пары воды.

Установка ловушки перед форвакуумным масляным насосом позволяет получить предельное остаточное давление  $1 \cdot 10^{-1}$  Па. Ловушки могут работать не менее 15 ч без доливки жидкого азота в диапазоне давлений  $10^5$ - $10^{-2}$  Па. Основные характеристики форвакуумной азотной ловушки ЛА-400:

- условный диаметр входного патрубка:  $d_y = 400$  [мм];
- проводимость: 5,9 [ $\text{м}^3/\text{с}$ ];
- количество жидкого азота: 2 [л];
- масса: 50 [кг].

На рисунке 19 изображена схема форвакуумной азотной ловушки.

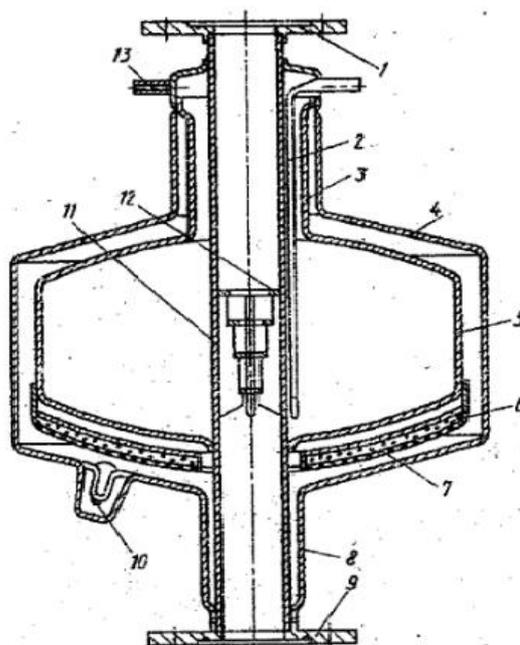


Рисунок 19 – Низкотемпературная форвакуумная азотная ловушка

1 и 9 - фланцы, 2 – трубка, 3 – горловина, 4 - сосуд Дьюара, 5 - внутренняя стенка сосуда Дьюара, 6 - сорбент, 7 – сетка, 8 – переходник, 10 - штуцер, 11 - трубка, 12 - защитный экран, 13 – патрубок.

### 3.1.2.5 Вакуумные трубопроводы

Вакуумные трубопроводы, работающие при температуре не выше 600°C, в зависимости от степени разреженности подразделяют на категории: низкий, средний, высокий и сверхвысокий вакуум. Технологические трубопроводы имитационных вакуумных установок обычно работают в условиях среднего и высокого вакуума и реже сверхвысокого.

При изготовлении и монтаже таких трубопроводов предъявляют повышенные требования к герметичности всех соединений и чистоте внутренних поверхностей. Это объясняется тем, что утечка небольшого количества газа из напорных трубопроводов, работающих под внутренним давлением, ничтожно мала по отношению к объему находящегося в нем газа, а натекание того же количества газа в трубопровод, работающий под вакуумом, резко меняет степень разрежения.

Кроме того, для получения необходимого вакуума в трубопроводе и аппаратуре требуется откачивать из них не только свободные газы, но и газы, связанные с поверхностью материала (адсорбированные) и с самим материалом (абсорбированные). На внутренней поверхности трубопроводов не допускаются какие-либо загрязнения, жиры и следы коррозии, так как в противном случае вызовет длительную откачку таких газов из вакуумной системы или вообще сделает ее невозможной.

Вакуумные трубопроводы монтируют из готовых блоков, узлов, труб, деталей и других изделий, поставляемых с заводов изготовителей с подтверждением их внутренней очистки, обезжиривания и испытания.

Для трубопроводов среднего и высокого вакуума применяют фланцы с уплотняющей поверхностью шип-паз, а низкого — с соединительным выступом или выступом-впадиной. Прокладки для фланцевых соединений изготавливают из вакуумной резины, а также комбинированные.

### **3.1.2.6 Запорно-регулирующая арматура**

Для вакуумных трубопроводов применяют специальную арматуру с сильфонным уплотнением, которая должна соответствовать требуемой категории вакуума и обеспечивать вакуумное уплотнение в любом положении запорного органа.

Запорно-регулирующая арматура представляет собой комплекс функциональных средств вакуумных систем, предназначенных для перекрытия газовых потоков, дозирования потоков газа, стабилизации давления газов в вакуумных системах и камерах, аварийной защиты вакуумных систем при разгерметизации, коммутации системы многопозиционной последовательной откачки и т.д.

Для перекрытия газовых потоков используют вакуумные клапаны и затворы, классифицированные по ряду признаков конструктивного и эксплуатационного характера. В конструктивном отношении клапаны и затворы подразделяют на угловые и проходные, по типу привода — на электромеханические, электромагнитные и электропневматические. В угловых

клапанах и затворах газовый поток меняет направление, встречая препятствие в виде уплотнительного клапана и стенок корпуса, в проходных — направление потока не меняется. В проходных клапанах отверстия полностью освобождены от уплотнительного диска. По основным характеристикам в системе используются запорная арматура ЗВЭ-1000 с проводимостью 242,2 [м<sup>3</sup>/с], ЗВЭ-800 с проводимостью 167,58 [м<sup>3</sup>/с], ЗВЭ-500 с проводимостью 68,81 [м<sup>3</sup>/с] и ЗВЭ-400 с проводимостью 46,25 [м<sup>3</sup>/с].

На рисунке 20 изображен вакуумный затвор.

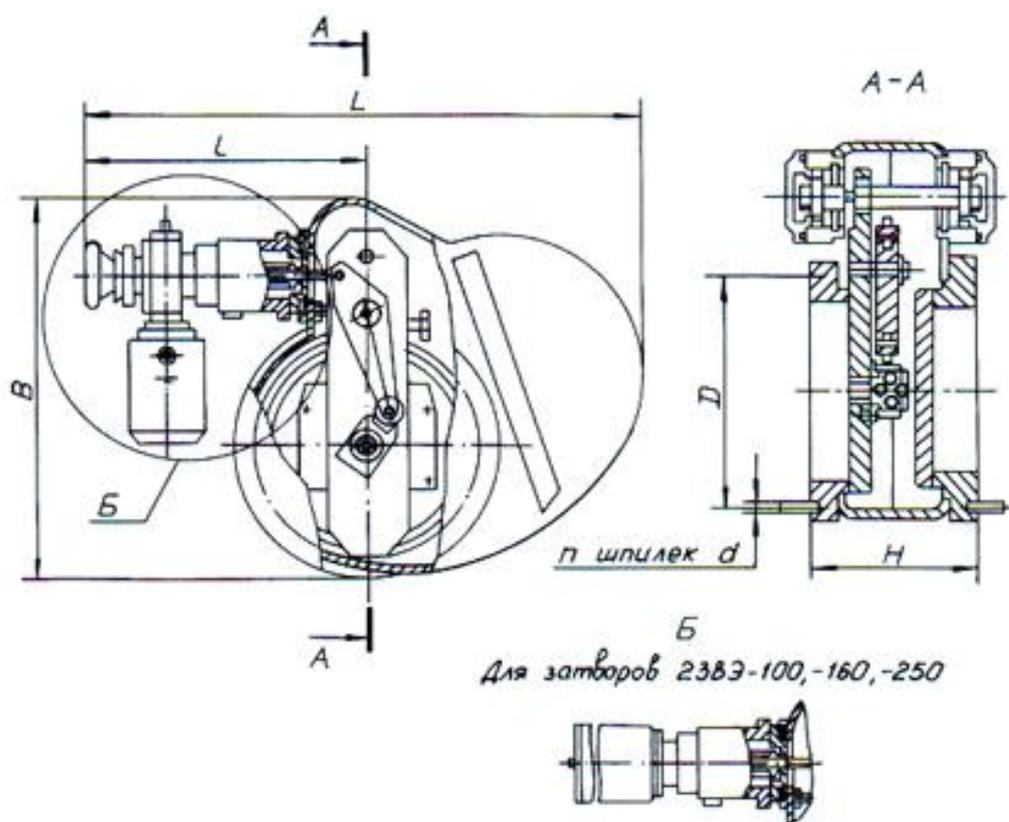


Рисунок 20 – Затвор вакуумный ЗВЭ-500

### 3.1.2.7 Манометрические преобразователи

Полное давление измеряют специальными приборами – манометрами. Манометры, предназначенные для измерения давлений меньше атмосферного, называют вакуумметрами. Основным элементом вакуумметров является измерительный преобразователь давления. Кроме того, как правило, они включают

измерительный блок. Преобразователь давления – устройство, вакуумно-плотно присоединяемое к вакуумному объему, воспринимающее непосредственно измеряемое давление и преобразующее его в другую физическую величину. Измерительный блок вакуумметра – устройство, обеспечивающее требуемый электрический режим работы преобразователя давления, усиление и измерение его выходного сигнала.

В данной системе используются деформационные, тепловые, магнитные и ионизационные манометрические преобразователи со следующими характеристиками:

Вакуумметр деформационный газоразрядный ВДГ-1:

- диапазон рабочих давлений:  $10^1-10^4$  [Па];
- погрешность измерения: 15%;
- габариты: 165×230×420 [мм];
- масса 10 [кг].

Вакуумметр тепловой ВТСО:

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

Вакуумметр магнитный ВМБ-14:

- диапазон рабочих давлений:  $10^{-7}-10^0$  [Па];
- погрешность измерения: 50%;
- габариты: 467×80×158 [мм];
- масса 4,2 [кг].

Вакуумметр ионизационный ВИ-14:

- диапазон рабочих давлений:  $10^{-8}-10^1$  [Па];
- погрешность измерения: 50%;
- габариты: 480×220×360 [мм];
- масса 20 [кг].

На рисунке 21 изображен электронный ионизационный манометрический преобразователь.

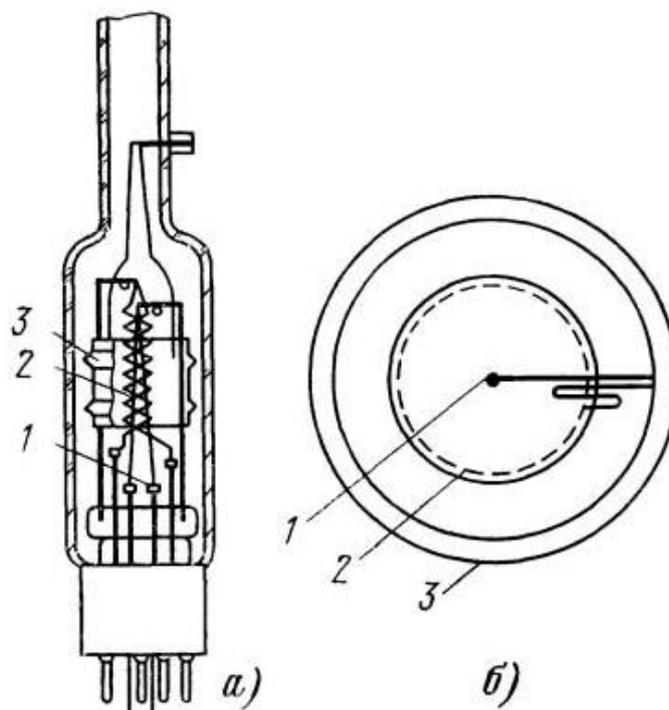


Рисунок 21 – Электронный ионизационный манометрический преобразователь

а) общий вид; б) траектория электронов: 1 – катод; 2 – анод (сетка); 3 – коллектор ионов.

### 3.1.3 Система разгерметизации

Система разгерметизации предназначена для напуска в камеру и шлюз сухого сжатого воздуха.

Техническая характеристика:

- разгерметизацию производят сухим воздухом;

Время разгерметизации:

- при работе двух редукторов – 40 [мин];

- при работе одного редуктора – 80 [мин].

Рабочее давление:

- в линии до редуктора в цеховой магистрали – 20 [МПа];

- в линии после редукторов – 0,2 [МПа].

Устройство и работа системы:

Для подсоединения системы разгерметизации используется общецеховой распределительный щит. Щит имеет два ввода от компрессорной станций высокого давления  $P = 400$  [кгс/см<sup>2</sup>]. Расход воздуха через один вывод составляет 0,25 [кг/с]. Пневмощит устанавливается рядом с общецеховым распределительным щитом и подсоединяется к его двум выводам ( $P=200$  кгс/см<sup>2</sup>). В пневмощите установлены ручные вентили для возможности подключения одного или двух выводов одновременно. В пневмощите системы установлены два редуктора, понижающие давление до 2 кгс/см<sup>2</sup>. Контроль давления на входе и выходе из редуктора осуществляется манометрами. На выходах из редукторов установлены ручные вентили с целью обеспечения выдачи воздуха через один или два редуктора одновременно. Оба вывода объединены в общий коллектор, который соединен с рассекателем, установленным внутри корпуса камеры. На этом коллекторе установлены вентиль запорный с электроприводом, вакуумный затвор, манометры и предохранительный клапан. До начала работы системы разгерметизации коллектор на участке от вентиля запорного с электроприводом до вакуумного затвора, связан с атмосферой. С этой целью на коллекторе установлен вентиль электропневманический, который в отключенном состоянии открыт. Параметры трубопроводов арматуры выбраны с учётом снижения шума в процессе разгерметизации.

#### **3.1.4 Система зарядки сжатыми газами**

Система зарядки сжатыми газами предназначена для зарядки изделия гелием, азотом, воздухом и смесями гелия и азота с воздухом. Зарядка сжатыми газами производится в различных диапазонах давлений:

1) Диапазон давлений азота и гелия:

- 0,5-2,5 кгс/см<sup>2</sup>;

- 10-50 кгс/см<sup>2</sup>;

- 110-250 кгс/см<sup>2</sup>.

2) Диапазон давлений воздуха:

- 0,5-10 кгс/см<sup>2</sup>;
- 47 кгс/см<sup>2</sup> (управляющие газы);
- 110-250 кгс/см<sup>2</sup>.

Питание системы осуществляется от общецеховой ресиверной. Система зарядки сжатыми газами управляется с пневмоцитов. В пневмоцисте установлены ручные вентили и автоматические электропневмоклапаны для дистанционного управления. В пневмоцисте системы установлен редуктор, понижающий давление в соответствии с требованиями предъявляемыми заказчиком ОИ. Контроль давления на входе и выходе из редуктора осуществляется манометрами и дистанционными датчиками давления, заведенными в систему управления.

### **3.1.5 Гелиевый течеискатель ТИ1-50**

Гелиевый масс-спектрометрический течеискатель ТИ1-50 предназначен для высокочувствительного обнаружения течей в объектах методами обдува, щупа, вакуумной камеры в режимах противотока и прямого потока. Пробный газ - гелий.

Область применения: атомная, авиационная, химическая промышленность, машиностроение и металлургия, научно-исследовательские работы, медицинская техника и др.

Особенности:

- сенсорная мнемосхема;
- управление с экрана монитора;
- выносной индикатор;
- возможность работы с вакуумными агрегатами исследуемых объектов или с собственным форвакуумным насосом;
- моноблочная вакуумная схема;
- высокая производительность за счет автоматического управления процес- сами подготовки и проведения измерений;
- работа без применения азотной ловушки;

- высокая надежность всех систем течеискателя за счет автоблокировки системы при аварийном выключении питания или нарушении герметичности по входу;

- защита анализатора от избытка по гелию;

- удобный пользовательский интерфейс с выводом графической и текстовой информации о работе системы, возможность сохранения данных в файле с последующей печатью результатов замера;

- широкий диапазон регистрируемых утечек;

- возможность заказа различных модификаций установки с форвакуумными и турбомолекулярными насосами других производителей.

На рисунке 22 изображен гелиевый течеискатель ТИ1-50.



Рисунок 22 – Гелиевый течеискатель ТИ1-50

Технические характеристики течеискателя ТИ1-50:

- чувствительность по гелию:  $5 \cdot 10^{-13}$  [м<sup>3</sup>Па/с];
- время отклика: 5 [с];

- скорость откачки вакуумных агрегатов: 6,4 [л/с];
  - время выхода на рабочий режим: 5 [мин];
  - габаритные размеры: 484×470×392 [мм];
- масса: 38 [кг].

### **3.1.6 Система рециркуляции азота**

Данная система предназначена для обеспечения безотходного использования жидкого азота. Отработанный азот, перешедший из жидкого состояния в газообразное состояние, проходя через систему рециркуляции вновь охлаждается и становится жидким, после чего возвращается обратно в резервуар и может быть вновь использован для проведения испытаний.

В состав системы входят:

- ресивер;
- теплообменники;
- криогенные насосы;
- турбонасос;
- турбодетандер;
- турбодетандер-компрессор.

### **3.1.7 Запасные части, инструменты и принадлежности**

Вакуумная установка комплектуется комплектом запасных частей, инструмента и принадлежностей согласно ведомости ЗИ.

Комплект ЗИП предназначен для обеспечения технического обслуживания установки, разборки и сборки ее узлов, агрегатов, а также для замены арматуры, приборов, сборочных единиц и деталей в случае выхода их из строя при эксплуатации.

В комплект запасных частей включены наиболее часто выходящие из строя при эксплуатации элементы оборудования установки: арматура, контрольно-измерительные приборы (мановакуумметры, манометрические преобразователи), элементы электрооборудования установки (розетки, вилки), крепежные детали (болты, гайки, шайбы), вентили, затворы, клапаны, металлорубка и т.д.

Вывод по разделу: в разделе была рассмотрена общая структура системы, описаны ее составляющие части с обоснованием их выбора и приведением основных характеристик.

## 4 ВАКУУМНЫЕ ИСПЫТАНИЙ

### 4.1 Тепловакуумные испытания

Тепловакуумные испытания являются комплексными (многофакторными) испытаниями, так как на испытуемый объект одновременно воздействуют как минимум два фактора – температура, диапазон которой может колебаться от  $-130^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ , и пониженное давление окружающей среды.

Целью таких испытаний является отработка конструкции ОИ и его систем на функционирование, определение предельных возможностей испытуемого объекта, определение прочностных характеристик конструкции, определение фактического устройства теплоизоляции ОИ, а также уточнение математической модели тепловых режимов ОИ в целом и его элементов.

Тепловакуумные испытания имеют следующие особенности:

1) При их проведении, когда исследуются процессы теплообмена элементов ОИ между собой и с окружающей средой, необходима имитация поглощения излучения космическим пространством и вакуума в пределах  $10^{-3}$  –  $10^{-4}$  Па.

2) Особое влияние на тепловое состояние оказывают вакуум, жесткие составляющие электромагнитного излучения, включая ультрафиолетовое, потоки протонов и электронов и др.

3) При отработке работоспособности узлов трения, электроконтактных механизмов, пиросредств, уплотнений в условиях космического пространства необходима имитация явлений десорбции поверхностных пленок, диффузии твердых веществ в вакууме. Для этого кроме воспроизведения внешних тепловых потоков требуется имитация более высокого вакуума ( $10^{-6}$  –  $10^{-8}$  Па).

В качестве экспериментальных средств для проведения тепловакуумных испытаний используются вакуумные камеры различных объемов, где размещаются имитаторы солнечного и планетного излучения, а также экраны, охлаждаемые криогенными жидкостями для обеспечения «черноты» и «холода» космического пространства.

Установки тепловакуумных испытаний (рисунок 23, а) предназначены для исследования тепловых балансов ОИ. Исследование распределения температур поверхностей ОИ проводится в режиме нормального функционирования всех его подсистем. По измеренным температурным полям рассчитывают температуры при различных положениях ОИ, используя методы математического моделирования. Рабочие давления при этих испытаниях  $p \sim 10^{-3} \dots 10^{-4}$  Па; кроме того, необходима имитация солнечных и других электромагнитных излучений космоса.

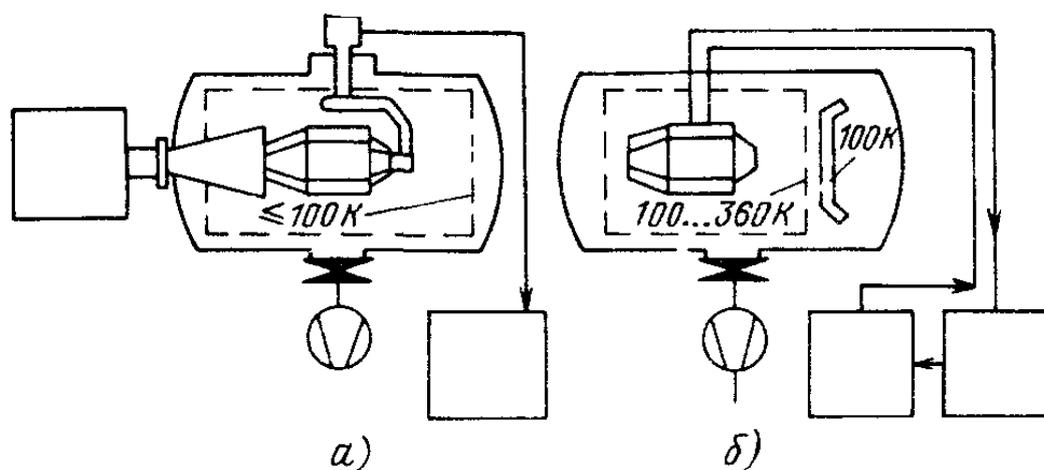


Рисунок 23 – Схемы моделирующих установок

а – тепловакуумные; б – вакуумно-температурные испытания

## 4.2 Вакуумно-температурные испытания

Вакуумно-температурные испытания – процесс проверки работоспособности каких-либо узлов и механизмов ОИ в условиях реализации на элементах конструкции испытуемого объекта экстремальных расчетных или экспериментально выявленных значений температур.

В этом случае имитационные системы тепловакуумной установки призваны обеспечить реализацию на элементах конструкции испытуемого объекта, какого-то заданного поля температур, чаще всего равномерного. Вакуумно-температурные испытания могут проводиться в установках, оснащенных системой вакуумирования, системой криогенных экранов и

имитатором расчетных внешних тепловых потоков, выполненным в виде совокупности условно точечных или линейчатых излучателей, которые размещаются на каком-либо каркасе вокруг испытуемого объекта. Здесь речь идет об имитаторах такого же типа, как и имитаторы воспроизведения расчетного теплового воздействия планет на поверхность ОИ. Об этих имитаторах – их конструктивных особенностях, о методике выбора оптимального режима работы, обеспечивающего максимально возможную точность моделирования расчетных тепловых потоков. Однако выбор режима имитатора при вакуумно-температурных испытаниях существенно отличается от решения аналогичной задачи при тепловакуумных испытаниях. Наличие в экспериментальной установке имитатора солнечного излучения не является обязательным. Следует заметить, что какое-то заданное переменное по поверхности элементов испытуемого объекта поле температур в процессе вакуумно-температурных испытаний воспроизвести в общем случае не удастся хотя бы потому, что задаваемое расчетное или экспериментально выявленное поле температур может формироваться в процессе сложного теплообмена (радиационного, кондуктивного, а часто внутреннего конвективного), надежно смоделировать который в виде функциональной зависимости энергетических параметров излучателей имитатора от геометрических, радиационных, а главное, теплофизических и конструктивных характеристик элементов испытуемого объекта практически невозможно, ввиду сложности и значительной неопределенности внутренних тепловых связей между элементами ОИ. Осуществимо лишь, и то при определенных условиях и с какой-то степенью приближения, воспроизведение или однородного поля температур, или неоднородного, но по поверхности, у которой локальный тепловой режим формируется в основном за счет внешнего теплообмена.

Установки вакуум-температурных испытаний (рисунок 23, б), в которых ОИ испытывается при экстремально низких давлениях ( $< 10^{-6}$  Па) и экстремальных температурах цикла (обычно от  $-70$  до  $+90^{\circ}\text{C}$ ), определенных в ходе тепловакуумных испытаний с функционирующими подсистемами. Как

показывает опыт, элементы аппаратуры ОИ, склонные к отказам, обнаруживают себя в ходе этих испытаний с большой вероятностью. Установки описанных выше типов имеют обычно большой объем ( $\sim 10^3 \dots 10^5 \text{ м}^3$ ).

В разрабатываемой крупногабаритной вакуумной камере устанавливаются криогенные панели и имитаторы солнечной активности, которые позволяют проводить тепловакуумные испытания.

Вывод по разделу: в разделе были описаны виды вакуумных испытаний, критерии их проведения и цели, преследуемые в ходе их проведения.

## 5 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 5.1 Технология проведения вакуумирования камеры

Исходное состояние:

- 1) Электрическое снабжение системы отключено;
- 2) Вентили, клапаны, вакуумные затворы закрыты за исключением вентиля натекаателей VF01-VF10;
- 3) Кнопки органа управления отжаты, тумблеры в положении «отключено», «выключено»;
- 4) Вакуумная камера открыта, крышка снята.

Подготовительные операции:

- 1) Набор готовности по сжатым газам;
- 2) Пополнение и подготовка криогенных компонентов;
- 3) Подача напряжения от системы электроснабжения (СЭС);
- 4) Проверка на холостом ходу дизельных генераторов, системы гарантированного электрического питания (СГЭП).

При загрузке объекта испытаний крышка фронтального загрузочного устройства отжимается и отводится в сторону, ОИ устанавливается на специальной тележке и по направляющим закатывается в ВК. Производится стыковка проверочной аппаратуры к ОИ. Проверяются стыки и разъемы ВК. Стыковка газовых коммуникаций при необходимости. После этого крышка фронтального загрузочного устройства закрывается. Проверяется плотность прилегания крышки по всей плоскости касания и усилие сжатия уплотнителя.

Для проверки на герметичность крышки включается один из форвакуумных насосов NL5. Открываются ручные вентили на преобразователях и с помощью деформационного манометрического преобразователя PD6, установленного перед насосом, проверяется падение давления. Если давление падает, то открываются вакуумные затворы VP02, VP21 байпасных линий, вакуумный затвор VP09 и захолаживаются азотные ловушки BL02...BL05. Начинается откачка ВК. Производится проверка ВК на герметичность методом обдува с по-

мощью гелиевого течеискателя. К камере через систему откачки подсоединяется гелиевый течеискатель, после чего в камеру подается под давлением гелий. При наличии течи гелий в результате перепада давлений поступает в вакуумируемый объем, соединенный с течеискателем, крышка отжимается и снова тщательно закрывается.

Вакуумирование:

Закрываются вентили натекаателей VF01-VF10 и запускаются остальные форвакуумные насосы NL2...NL4.

Открываются вакуумные затворы VP15, VP17, VP19 байпасных линий. Закрываются напускные клапаны и открываются вакуумные затворы VP14, VP16, VP18 и начинается откачка ВК форвакуумными насосами. С помощью тепловых манометрических преобразователей PT01,PT02 проверяется давление в ВК, при достижении давления  $1 \cdot 10^0$  Па открываются вакуумные затворы VP08...VP11 и закрываются все байпасные линии. Производится откачка высоковакуумного коллектора и ВК до давления  $1 \cdot 10^{-1}$  Па, давление запуска турбомолекулярных насосов.

При достижении давления в ВК равного  $1 \cdot 10^{-1}$  Па, на манометрических преобразователях PT01,PT02, производится запуск турбомолекулярных насосов NR2...NR4. Закрывается вакуумный затвор VP09 и открываются вакуумные затворы VP04...VP06. Вакуумирование камеры осуществляется до давления испытаний  $1 \cdot 10^{-6}$  Па, контроль давления осуществляется с помощью ионизационного преобразователя PA0.1.

После откачки ВК до давления  $1 \cdot 10^{-6}$  Па выполняется одновременно включение криогенных насосов и выключение механических насосов.

Осуществляется захолаживание крионасосов до температуры ниже 77 К, закрывается вакуумный затвор VP01. Открываются вакуумные затворы VP22...VP24 и клапаны выдачи жидкого азота, закрываются вакуумные затворы VP04...VP06. Начинают работать криогенные насосы и производится захолаживание криопанелей, выключаются турбомолекулярные и золотниковые насосы. Производится напуск воздуха в коллектор через натекаатель VF10. При

достижении давления в коллекторе равного атмосферному давлению закрываются вакуумные затворы VP08...VP20. Завершается работа механических насосов.

Поддержание вакуума в камере осуществляется криогенными насосами, при этом давление  $P \leq 1 \cdot 10^{-6}$  Па.

ВК откачена и готова к проведению вакуумных испытаний.

Контроль степени вакуума в камере ведется по манометрическому преобразователю PA0.1.

Охлаждаемые жидким азотом панели выполняют функции криогенных насосов, т.е. обеспечивают вакуум за счет конденсации на их поверхности паров и газов, критические температуры которых выше критической температуры применяемого хладагента, также панели позволяют получать на поверхностях элементов конструкции ОИ (например, на материалах тепловой защиты) отрицательные температуры.

После завершения работы системы откачки, в состав которой входят насосы, обеспечивающие различный уровень вакуума, т.е. значения давления в вакуумной камере  $10^{-8}$  Па, запускается циклограмма испытаний космического лунного модуля с заданными исходными параметрами по массово-энергетическому и объемно-геометрическому содержанию в условиях имитации космического пространства.

Зарядка объекта испытаний осуществляется системой зарядки сжатыми газами. Испытание объекта на герметичность основано на определении возможного натекания из модуля при помощи контрольно-измерительного оборудования вакуумной камеры. Поиск неисправностей производится согласно технической документации.

При проведении испытаний должны обеспечиваться помимо требований чертежей и инструкции по эксплуатации требования технических условий, инструкции по монтажу, технических описаний на оборудование.

До начала испытаний должны быть подготовлены и проверены на соответствие технические документации, все необходимые материалы, контрольно-

измерительные приборы, испытательные схемы, оборудование для проведения испытаний на прочность и герметичность.

Температура окружающей среды при проведении испытаний в помещениях должны быть не ниже 5<sup>0</sup> С.

К проведению испытаний допускаются персонал, изучивший устройство системы, инструкцию по эксплуатации вакуумной установки, технические требования чертежей, правила техники безопасности, аттестованный и имеющий соответствующее удостоверение.

Сжатые газы (воздух, гелий, азот), применяемые при испытаниях на герметичность должны соответствовать требованиям ГОСТ, ОСТ, ТУ.

При испытаниях соблюдать требования согласно инструкции и правил техники безопасности, проекта производства и технологии монтажа.

Испытания должны осуществляться дистанционно. Персонал, проводящий испытания, а также арматура, через которую производится подъем и снижение давления, или управление арматурой, сигнализация ее положения, манометры и вакуумметры должны находиться в безопасном месте, оговоренном проектом производства работ или технологией монтажа. Зона испытаний должна быть ограждена и должны быть вывешены плакаты: «Осторожно – идут испытания».

Давление в испытуемом объекте должно повышаться плавно, с выдержками.

Испытание следует прекратить, если будут обнаружены следующие неисправности:

- при подъеме давления слышен звук (шум или треск) в испытываемом объекте;
- повышается давление в вакуумной полости;
- происходит падение давления в испытываемой полости;
- происходит деформация или другие дефекты оборудования.

При аварийной ситуации: пропадание электроэнергии, прорыва атмосферы в коллектор, вакуумную камеру, измерительные коллекторы по сигналу ма-

нометрического преобразователя РМ0.1, РМ1.1, РМ2.1 выключаются насосы, закрываются вентили на измерительные коллекторы и коллектора откачки. Открываются натекатели VF1, VF2.

Технология проведения вакуумирования камеры для испытания лунных модулей представлена в алгоритме технологического процесса.

Вывод по разделу: в рамках технологической части была описана технология проведения вакуумирования камера.

## 6 СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 6.1 Виды систем водяного охлаждения

Многие промышленные процессы сопровождаются выделением большого количества теплоты, которая, в свою очередь, должна быть использована или отведена. Исходя из экономической целесообразности, в качестве основной транспортирующей среды, зачастую, используют воду. По критерию водоносности разделяют следующие виды водяного охлаждения:

- замкнутые;
- незамкнутые (проточные);
- открытые.

#### 6.1.1 Замкнутые системы охлаждения

Охлаждение нагретой воды в замкнутых системах производится при помощи теплообменника. Охлаждение теплообменника может производиться как через вторую открытую систему охлаждения (вторичную систему), так и при помощи воздуха в аппарате воздушного охлаждения.

Теплообменники - это аппараты, которые передают тепловую энергию от нагретого носителя тепла к более холодному носителю. В качестве рабочей среды, переносящей тепло, выступает жидкость или газообразное вещество.

Применение теплообменников довольно широко. Востребован данный вид оборудования во многих отраслях индустрии. Применяются теплообменники и на электростанциях для того, чтобы повысить коэффициент полезного действия. С помощью теплообменников можно повысить не только экономические характеристики электростанции, но и эксплуатационные. Если применять теплообменное оборудование совместно с электростанцией, то можно заниматься подготовкой воды для того, чтобы обеспечивать ей системы отопления или горячего водоснабжения.

На рисунке 24 изображена схема циркуляционной системы охлаждения закрытого типа.

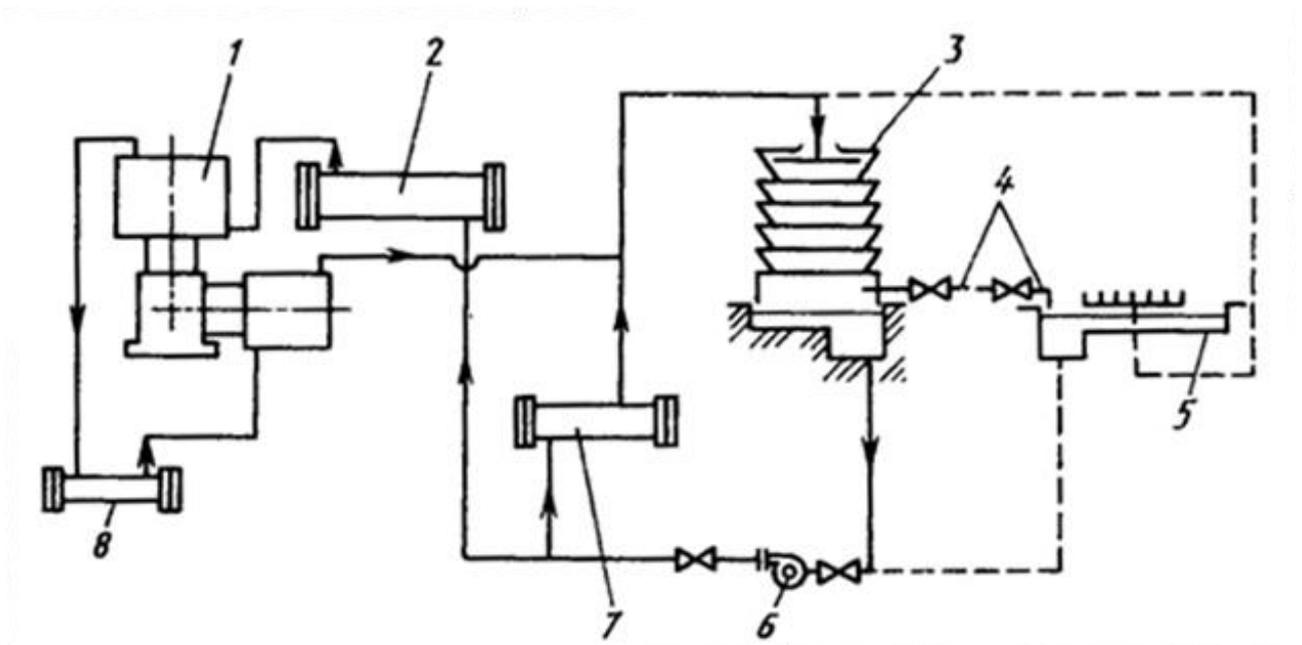


Рисунок 24 – Схема циркуляционной системы охлаждения закрытого типа  
 1 – компрессор; 2 – промежуточный холодильник; 3 – градирня; 4 – подпиточный трубопровод; 5 – бассейн; 6 – насос; 7 – концевой холодильник; 8 – масляный холодильник

Теплообменники применяются также для обогрева воздуха в различных помещениях и на различных линиях производства. Важную функцию несет теплообменное оборудование и на атомных электростанциях. Его применение востребовано не только в энергетической промышленности, но и во многих других: нефтеперерабатывающей, газодобывающей, химической и т.д.

Теплообменные аппараты классифицируются по конструкции. Существует несколько видов теплообменников:

а) Теплообменники контактные. В подобном виде оборудования потоки греющей и нагреваемой рабочей среды, жидкой или газообразной, имеют прямой контакт друг с другом. Примером данного теплообменного устройства является струйный конденсатор. Принципом работы его является разбрызгивание воды, которая используется для конденсации водяного пара.

б) Теплообменники поверхностные. В данном виде оборудования теплоноситель и среда нагреваемая разделены тонкой стенкой. Данная стенка назы-

вается теплообменной поверхностью, часть которой соприкасается с нагревающим и нагреваемым потоком. Примером данного поверхностного теплообменного оборудования является автомобильный радиатор. В нем жидкость системы охлаждения мотора и более холодная атмосферная воздушная масса размещены по разные стороны стенки решетки, которая состоит из медных или латунных тонких радиаторных трубок.

в) Теплообменники жаротрубные. В данных теплообменниках сгорание топлива образует поток горячих газообразных сред. Примером могут служить паровые и бытовые котлы водяного отопления с топочным приспособлением.

г) Теплообменники пластинчатые и ребристые, со значительной площадью поверхности. Такое теплообменное оборудование имеет в конструкции поперечные ребра, в результате чего площадь теплообменной поверхности увеличивается. В отличие от трубных теплообменников, ребристые имеют более компактные размеры. При одинаковых рабочих режимах ребристые теплообменники имеют более насыщенную теплопередачу на единицу объема. Крепятся ребра к поверхности труб или твердым припоем или мягким припоем.

д) Теплообменники противоточные или противопоточные. Такие аппараты основаны на встречном движении двух рабочих сред. Данный процесс обеспечивает передачу температуры от одной среды к другой.

Показатель интенсивности теплопередачи определяется разностью температуры нагревающей и нагреваемой среды. Этот показатель напрямую связан с тепловым сопротивлением рабочих объектов, которые контактируют с поверхностью теплового обмена, и с тепловым сопротивлением стенки. От накипи, которая образуется на поверхности теплообмена, тепловое сопротивление увеличивается. Вследствие чего полная интенсивность тепловой передачи становится пропорциональной площади теплообмена в теплообменном оборудовании.

Холодильники – предназначены для охлаждения различных сред. В холодильниках охлаждающей средой выступает любая нетоксичная жидкость, не пожароопасная и невзрывоопасная или вода. Применяется данное теплообмен-

ное оборудование в регионах, имеющие тропический или умеренный климат, и в регионах, расположенных в сейсмических поясах по шкале Рихтера до 7 баллов.

Различают аппараты одноходовые и многоходовые, количество ходов определяется желанием заказчика. Конструктивное исполнение данного теплообменного оборудования может быть либо вертикальным, либо горизонтальным. Закрепление труб в трубных решетках происходит путем развальцовки и обварки, если отсутствуют указания на конкретный метод соединения. Холодильники имеют следующие технические показатели: температура теплообмениваемых сред в трубах  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ , в кожухе  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+300^{\circ}\text{C}$ ; условное давление в трубах 0,6 МПа; давление в кожухе 0,6-4,0 МПа.

Конденсаторы – предназначены для конденсации рабочих сред в кожухе. Применяются в регионах с тропическим и умеренным климатом и в регионах, расположенных в сейсмических поясах по шкале Рихтера до 7 баллов. Конструктивное исполнение данного теплообменного оборудования может быть либо вертикальным, либо горизонтальным. Закрепление труб в трубных решетках происходит путем развальцовки и обварки, если отсутствуют указания на конкретный метод соединения. Конденсаторы имеют следующие технические показатели: площадь поверхности теплообмена  $45-716\text{ м}^2$ ; рабочее давление в кожухе 0,6-1,6 МПа; в трубах давление 0,6 МПа; температура в кожухе  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+300^{\circ}\text{C}$ ; температура в трубах  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ .

Испарители – Область применения: испарение специальных технологических сред в процессе производства. Применяются в регионах с тропическим и умеренным климатом и в регионах, расположенных в сейсмических поясах по шкале Рихтера до 7 баллов. По требованию заказчика уплотнительная поверхность может изготавливаться по типу «шип-паз». Количество ходов определяется желанием заказчика. Конструктивное исполнение данного теплообменного оборудования может быть либо вертикальным, либо горизонтальным. Закрепление труб в трубных решетках происходит путем развальцовки и обварки, если отсутствуют указания на конкретный метод соединения. Испарители имеют

следующие технические показатели: диаметр 600-1400 мм; площадь поверхности теплообмена 40-490 м<sup>2</sup>; размер теплообменных труб 2000-4000 мм в длину; диаметр и толщина стенки трубы 25x2 мм; температура теплообменных сред в кожухе и трубах -70°С до +350°С.

Типичным примером закрытых циркуляций является охлаждение кокилей при непрерывном литье. Из-за высоких температур, и связанной с этим опасностью отложений жесткости с катастрофическими последствиями (излом кокиля), кокиль в закрытой системе охлаждается обессоленной или умягченной водой. Обратное охлаждение производится часто при помощи пластинчатого теплообменника и вторичной открытой системы охлаждения.

Потери воды в закрытых системах охлаждения естественным образом значительно меньше. Подпитка производится преимущественно умягченной или полностью обессоленной водой. Относительно обработки воды, эти системы требуют немного ухода, так как концентрация применяемых химических веществ остается более-менее постоянной. Так как умягченная или полностью обессоленная вода ведет себя агрессивно по отношению к перерабатываемым обычно в таких системах веществам, следует позаботиться, в первую очередь, о хорошей коррозионной защите.

### **6.1.2 Незамкнутые (проточные) системы охлаждения**

В незамкнутых (проточных) системах теплоноситель подается извне, нагревается у источника тепла и направляется во внешнюю среду. В этом случае она играет роль охладителя, предоставляя необходимый объем теплоносителя нужной температуры на входе и принимая нагретый на выходе.

Самым простым, а там, где в достаточном количестве имеется вода, одновременно и экономичным методом относительно техники и расходов является прямоточное водное охлаждение, так как эффективность большинства термических процессов повышается со снижением температуры хладоносителей. Вода берется, как правило, из водоприемника (река, канал, озеро), проводится через теплообменники, и уже теплая возвращается в источник воды. В целях экономии воды теплая охлаждающая вода может быть использована повторно в

дальнейшем процессе охлаждения, при котором допустим более высокий температурный режим.

Так как при однократном использовании требуются очень большие количества воды, применяются недорогие, не затратные методы водоподготовки. Водоподготовка ограничивается обычно фильтрацией через песочные фильтры, химическая обработка воды обычно не производится. Связанные с этим проблемы в системе охлаждения как коррозия, образование отложений или рост микробиологии определяются свойствами используемой воды.

На рисунке 25 изображена схема проточного охлаждения.

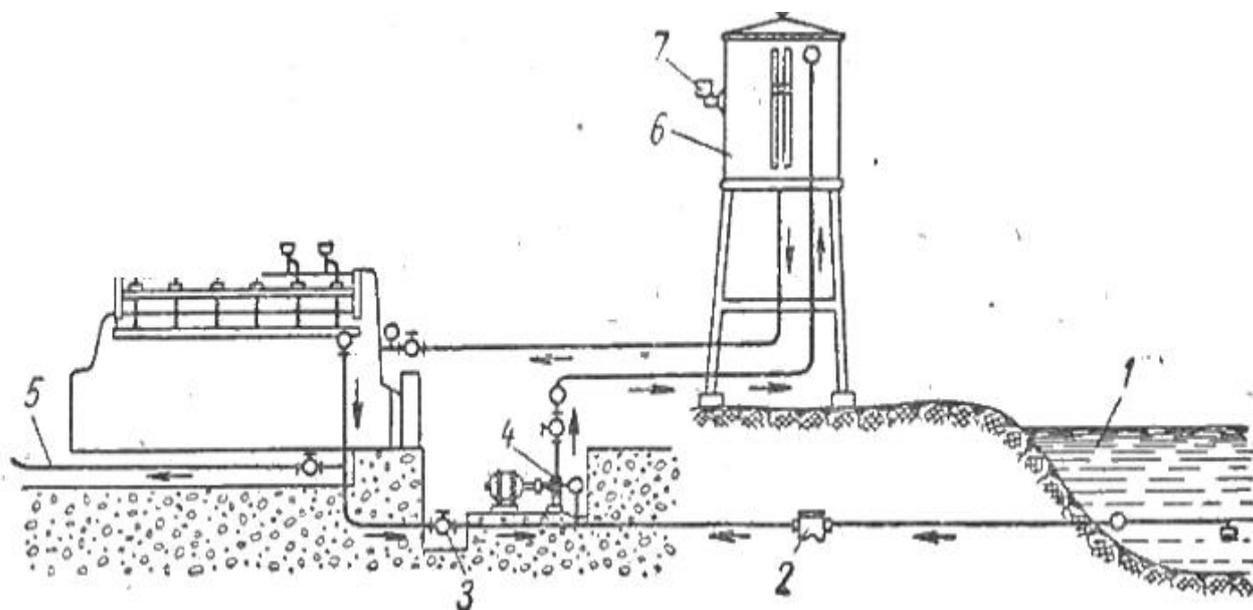


Рисунок 25 – Схема проточного охлаждения

1 – водоем; 2 – фильтр; 3 – вентиль перепуска теплой воды; 4 – центробежный насос; 5 – выпуск воды; 6 – напорный бак; 7 – сигнализация уровня

### 6.1.3 Открытые системы охлаждения (испарительное охлаждение)

При этом методе, охлаждения испарением, с точки зрения химической обработки воды речь идет о повторном использовании охлаждающей воды. Циркуляционную систему охлаждения можно описать кратко следующим образом: требуемое количество охлаждающей воды берется из чаши градирни и с

помощью водных насосов проводится через холодильные установки. Нагретая там охлаждающая вода возвращается в градирню. Там возникают потери воды за счет испарения и обессоливания, эти потери должны компенсироваться подпиточной водой. Нагревание в теплообменниках соответствует охлаждению в градирне.

Существенное отличие от проточного охлаждения состоит в необходимости пополнения потерь при испарении, при котором одновременно происходит сгущение растворенных в воде солей (повышение концентрации солей). В результате этого механическая и/или химическая обработка подпиточной воды становится неизбежной.

На рисунке 26 изображена схема открытой, водооборотной системы охлаждения.

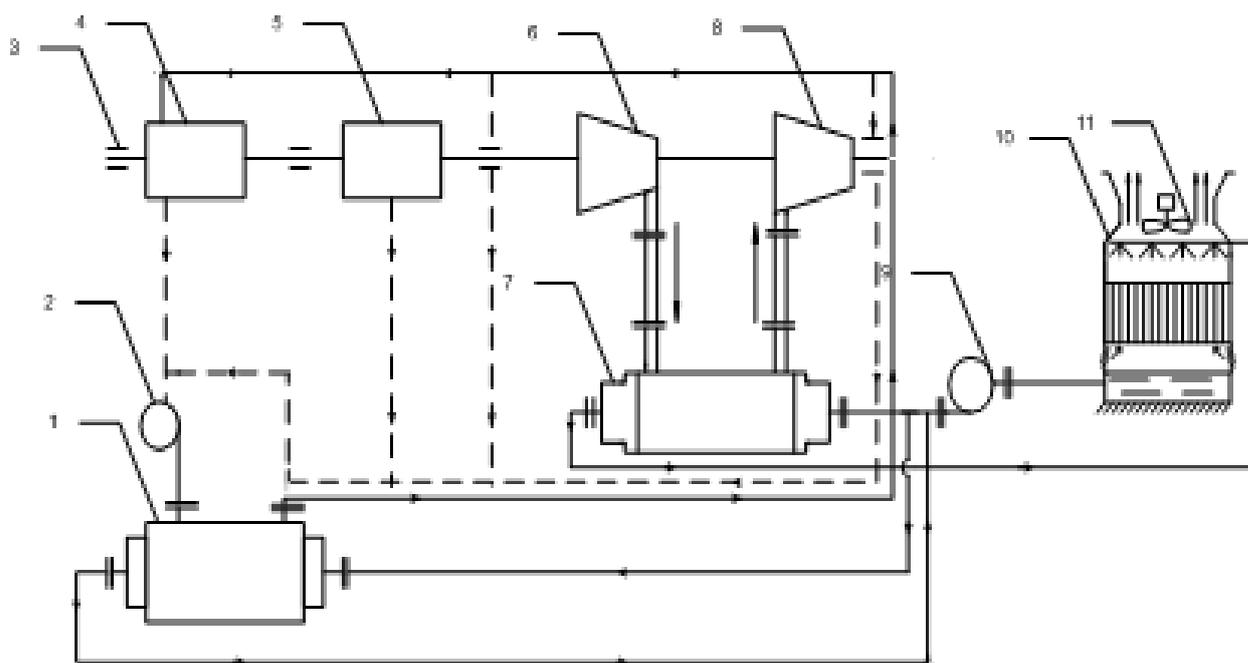


Рисунок 26 – Открытая водооборотная система охлаждения многоступенчатого компрессора

1 – маслоохладитель; 2 – маслонасос; 3 – подшипник; 4 – редуктор; 5 – муфта; 6 – ступень сжатия; 7 – газовойдяной охладитель; 8 – ступень; 9 – насос перекачки охлажденной воды; 10 – открытая градирня; 11 – вентилятор

## **6.2 Расчет и выбор насоса системы водяного охлаждения**

Резюмируя описанные выше достоинства и недостатки трех типов систем охлаждения, наиболее подходящим выбором становится замкнутая система охлаждения в виду своей универсальности и надежности. Так же, значительным фактором, влияющим на выбор системы охлаждения, будет являться удаленность предприятия от различного рода водоемов, которые, в свою очередь, могли бы являться источниками воды для системы.

Исходя из перечисленных факторов, влияющих на выбор системы и непосредственно выбор самой системы, встает вопрос выбора насоса системы охлаждения. С точки зрения экономической целесообразности и практического применения объективным выбором будет водяной одноступенчатый центробежный насос.

Центробежные насосы являются одним из наиболее многочисленных представителей динамических насосов и широко распространены. Рабочим органом в центробежных насосах является насаженное на вал колесо, имеющее лопасти, заключенные между дисками, и расположенное внутри спиралевидного корпуса.

За счет вращения колеса создается центробежная сила, воздействующая на массу перекачиваемой среды, находящейся внутри колеса, и передает ей часть кинетической энергии, которая затем переходит в потенциальную энергию напора. Создаваемое при этом в колесе разрежение обеспечивает непрерывную подачу перекачиваемой среды их всасывающего патрубка. Важно отметить, что перед началом эксплуатации центробежный насос должен быть предварительно заполнен перекачиваемой средой, так как в противном случае всасывающей силы будет недостаточно для нормальной работы насоса.

Центробежный насос может иметь не один рабочий орган, а несколько. В таком случае насос называется многоступенчатым. Конструктивно он отличается тем, что на его валу расположено сразу несколько рабочих колес, и жидкость последовательно проходит через каждое из них. Многоступенчатый насос при той

же производительности будет создавать больший напор в сравнении с аналогичным ему одноступенчатым насосом.

На рисунке 27 изображена схема работы многоступенчатого насоса.

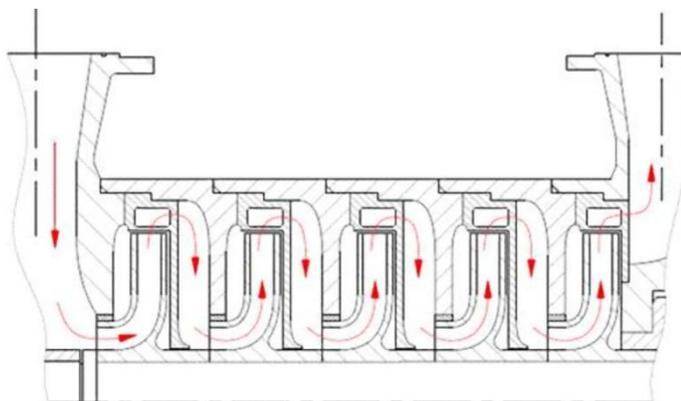


Рисунок 27 – Схема работы многоступенчатого насоса

Центробежные насосы относятся к группе лопастных насосов, у которых передача энергии от привода к жидкости осуществляется за счет динамического взаимодействия лопастей рабочего колеса с обтекающей их жидкостью. На рисунке 1.5 представлена упрощенная принципиальная схема центробежного насоса. На валу 1 насоса закреплено рабочее колесо, состоящее из ведущего 2 и ведомого 3 дисков. Между ними находятся изогнутые лопатки 4. Зачастую все рабочее колесо представляет собой единую литую конструкцию. Рабочее колесо расположено в спиральной камере 5, называемой также отводом. На спиральной камере насоса напротив оси рабочего колеса крепится подвод 6, к которому подсоединяется трубопровод всасывания. Спиральная камера имеет постепенно увеличивающуюся площадь поперечного сечения и переходит в диффузор 7, к которому подсоединяется трубопровод нагнетания.

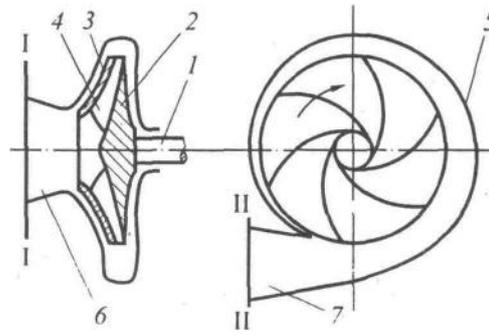


Рисунок 28 – Принципиальная схема центробежного насоса

1 — вал; 2 — ведущий диск рабочего колеса; 3 — ведомый диск рабочего колеса; 4 — лопатка; 5 — отвод; 6 — подвод; 7-диффузор

### 6.2.1 Расчет производительности центробежного насоса

$$Q = b_1(\pi D_1 - \delta Z)C_1 = b_2(\pi D_2 - \delta Z)C_2 \quad (88)$$

где  $Q$  – производительность центробежного насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$b_{1,2}$  – ширины прохода колеса на диаметрах  $D_1$  и  $D_2$ , м;

$D_{1,2}$  – внешний диаметр входного отверстия (1) и внешний диаметр колеса (2), м;

$\delta$  – толщина лопаток, м;

$Z$  – число лопаток;

$C_{1,2}$  – радиальные составляющие абсолютных скоростей на входе в колесо (1) и выходе из него (2), м/с.

### 6.2.2 Расчет напора

Напор не является геометрической характеристикой и не может отождествляться с высотой, на которую необходимо поднять перекачиваемую жидкость. Необходимое значение напора складывается из нескольких слагаемых, каждое из которых имеет свой физический смысл.

Общая формула расчета напора (диаметры всасывающего и нагнетающего патрубков приняты одинаковыми):

$$H = (p_2 - p_1) / (\rho \cdot g) + H_T + h_{\Pi} \quad (89)$$

где  $H$  – напор, м;

$p_1$  – давление в заборной емкости, Па;

$p_2$  – давление в приемной емкости, Па;

$\rho$  – плотность перекачиваемой среды, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$H_T$  – геометрическая высота подъема перекачиваемой среды, м;

$h_{\Pi}$  – суммарные потери напора, м;

Первое из слагаемых формулы расчета напора представляет собой перепад давлений, который должен быть преодолен в процессе перекачивания жидкости. Возможны случаи, когда давления  $p_1$  и  $p_2$  совпадают, при этом создаваемый насосом напор будет уходить на поднятие жидкости на определенную высоту и преодоление сопротивления.

Второе слагаемое отражает геометрическую высоту, на которую необходимо поднять перекачиваемую жидкость. Важно отметить, что при определении этой величины не учитывается геометрия напорного трубопровода, который может иметь несколько подъемов и спусков.

Третье слагаемое характеризует снижение создаваемого напора, зависящее от характеристик трубопровода, по которому перекачивается среда. Реальные трубопроводы неизбежно будут оказывать сопротивление току жидкости, на преодоление которого необходимо иметь запас величины напора. Общее сопротивление складывается из потерь на трение в трубопроводе и потерь в местных сопротивлениях, таких как повороты и отводы трубы, вентили, расширения и сужения прохода и т.д. Суммарные потери напора в трубопроводе рассчитываются по формуле:

$H_{об}$  – суммарные потери напора, складывающиеся из потерь на трение в трубах  $H_T$  и потерь в местных сопротивлениях  $H_{мс}$ .

$$H_{об} = H_T + H_{MC} = (\lambda \cdot l) / d_3 \cdot [w^2 / (2 \cdot g)] + \sum \zeta_{MC} \cdot [w^2 / (2 \cdot g)] = ((\lambda \cdot l) / d_3 + \sum \zeta_{MC}) \cdot [w^2 / (2 \cdot g)] \quad (90)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения;

$l$  – длина трубопровода, м;

$d_3$  – эквивалентный диаметр трубопровода, м;

$w$  – скорость потока, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$w^2 / (2 \cdot g)$  – скоростной напор, м;

$\sum \zeta_{MC}$  – сумма всех коэффициентов местных сопротивлений;

### 3.2.3 Определение основных размеров насоса

Входное отверстие насоса должно обеспечить подвод расчетного количества жидкости. Это достигается при выполнении условия:

$$G_{ж.р./c_1} = \pi(r_1^2 - r_0^2) \quad (91)$$

где  $c_1 = 1 \dots 2$  – скорость жидкости на входе, м/с;

$r_1$  и  $r_0$  – радиус входного отверстия и ступицы крыльчатки, м.

Из равенства определяют радиус входного отверстия крыльчатки:

$$r_1 = \sqrt{\frac{G_{ж.р.}}{\pi c_1} + r_0^2} \quad (92)$$

Окружная скорость схода жидкости:

$$u_2 = \sqrt{1 + tg \alpha_2 \cdot ctg \beta_2} \cdot \sqrt{\frac{p_{ж}}{\rho_{ж} \eta_{к}}} \quad (93)$$

где  $\alpha_2$  и  $\beta_2$  – углы между направлениями скоростей  $c_2$ ,  $u_2$  и  $w_2$ ;

$p_{ж} = (5 \dots 15) \cdot 10^4$  – напор, создаваемый насосом, Па;

$\eta_h = 0,6 \dots 0,7$  – гидравлический КПД.

При построении профиля лопатки крыльчатки принимают угол  $\alpha_2 = 8 \dots 12^\circ$ , а угол  $\beta_2 = 12 \dots 50^\circ$ . С увеличением  $\beta_2$  растет напор, создаваемый насосом, поэтому иногда этот угол берут равным  $90^\circ$  (радиальные лопатки). Однако увеличение  $\beta_2$  приводит к уменьшению КПД насоса.

Радиус крыльчатки на выходе, м:

$$r_2 = \frac{30u_2}{\pi n_{в.н.}} = \frac{u_2}{\omega_{в.н.}} \quad (94)$$

где  $n_{в.н.}$  – частота вращения крыльчатки в минуту;

$\omega_{в.н.}$  – угловая скорость крыльчатки жидкостного насоса.

Окружная скорость (м/с) определяется из равенства:

$$u_1 = \frac{u_2 r_1}{r_2} \quad (95)$$

На рисунке 29 изображена расчетная схема крыльчатки водяного насоса.

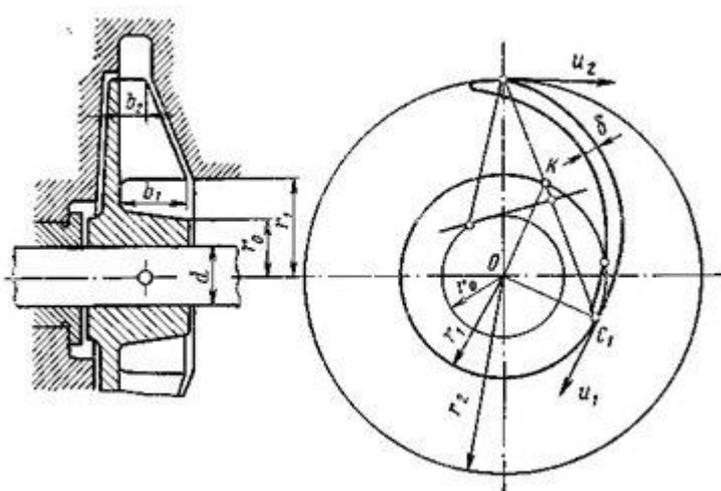


Рисунок 29 – Расчетная схема крыльчатки водяного насоса

Мощность, потребляемая жидкостным насосом:

$$N_{\text{В.Н.}} = \frac{G_{\text{Ж.Р.}} P_{\text{Ж}}}{1000 \eta_{\text{М}}} \quad (96)$$

где  $\eta_{\text{М}} = 0,7 \dots 0,9$  – механический КПД жидкостного насоса.

Величина  $N_{\text{В.Н.}}$  составляет 0,5 ... 1,0 % от номинальной мощности двигателя.

Вывод по разделу: в рамках данного размера были описаны виды систем водяного охлаждения по критерию водоносности, приведена методика расчета и осуществлен выбор насоса системы водяного охлаждения.

## 7 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

### 7.1 Меры безопасности при проведении работ на вакуумной станции

Испытания на герметичность, проводимые в вакуумной камере относятся к числу сложных и опасных. Это обусловлено наличием опасных и вредных факторов:

- работа обслуживающего персонала с сосудами, находящимися под давлением;
- работа со сжатыми газами, жидким азотом, инертными газами;
- работа обслуживающего персонала на высоте и с электрооборудованием.

Настоящий раздел имеет цель обеспечить безопасность обслуживающего персонала при эксплуатации вакуумной станции и устранении неисправностей ее составных частей.

Организационные мероприятия:

- выдачи наряда или распоряжение на производство работ;
- наличие допуска персонала к самостоятельной работе;
- инструктаж перед началом работ, допуск к работе;
- организация перерывов и окончание работ.

Технические мероприятия:

- производство необходимых отключений (включений) и принятия мер к несанкционированному и самопроизвольному включению коммутационной аппаратуры;
- проверка отсутствия давления или вакуума в магистралях и на оборудовании, вывешивание предупреждающих плакатов;
- ограждение рабочего места.

#### 7.1.1 Общие правила безопасности труда

К эксплуатации вакуумной станции допускается лица, прошедшие медицинское освидетельствование, сдавшие зачет на знание устройства и принципа действия вакуумной станции, правил ее эксплуатации, мер безопасности, а также правил оказания до врачебной медицинской помощи.

Прием зачетов проводит комиссия, назначаемая приказом эксплуатирующей организации. Лицам, сдавшим зачет, должны быть выданы удостоверения на право допуска к работе на вакуумной станции. Допуск оформляется приказом по эксплуатирующей организации. Периодическая проверка знаний правил и мер безопасности при работе проводится через 12 месяцев. В случае длительного перерыва в работе (более 2-х месяцев) работник допускается к эксплуатации вакуумной станции после повторной сдачи зачетов.

Перед началом работ на вакуумной станции каждый должен получить задание на работу и пройти инструктаж на рабочем месте, о чем в журнале по технике безопасности делается соответствующая отметка за подписями лица, проводившего инструктаж и лица, допускаемого к проведению работы.

При эксплуатации вакуумной станции запрещается:

- загромождать проходы;
- хранить в помещениях вакуумной станции предметы, не относящиеся к оборудованию станции;
- работать при неисправном освещении;
- отходить от работающей станции и оставлять ее без надзора и контроля;
- прикасаться к движущимся и вращающимся составным частям;
- ударять и встряхивать манометрические преобразователи;
- использовать неисправные или непроверенные средства измерений;
- применять средства измерений с разбитыми стеклами или другими повреждениями;
- становиться на трубопроводы и кабели, а также нагружать их посторонними предметами;
- протирать оборудование до его выключения (остановки);
- разбирать составные части, находящиеся под вакуумом, давлением;
- применять нештатные и неисправные инструменты и принадлежности;

- применять нестандартные ключи и ключи с удлинителями для затягивания соединений трубопроводов и арматуры;
- использовать непригодные для работы защитные средства;
- применение одежды из синтетических тканей, а также изделий из материалов, на которых аккумулируются заряды статического электричества.

При обработке внутренних поверхностей корпуса вакуумной камеры бензином и спиртом должны работать в шланговом противогазе (изолирующем противогазе) при обязательной приточно-вытяжной вентиляции.

### **7.1.2 Основные требования охраны труда при проверке масс-спектрометрическим методом**

К проверке герметичности допускаются лица, изучившие схему, устройство течеискателя, приборов и установок с рабочим напряжением до 1000 В и правила пользования или окончившие специальные курсы и аттестованные отделом кадров предприятия.

Ремонт подводящего кабеля, проверка целостности его заземления, планово-предупредительный ремонт электротехнической части течеискателя осуществляет электротехнический персонал. Сроки выполнения отмечаются в паспорте. Работа с течеискателем, не прошедшим планово-предупредительную проверку и техническое обслуживание, категорически запрещается.

Во время работы с течеискателем следить за его исправностью и при обнаружении неисправности немедленно прекращать работу и доложить руководителю работ.

Работающий и находящийся под напряжением течеискатель запрещается вскрывать, заменять отдельные элементы, замерять параметры электросхемы прибора. Нельзя прикасаться к оголенным токоведущим частям.

При работе течеискателя с открытой передней стенкой во время проведения регламентных работ и настройки течеискателя категорически запрещается замыкать кнопки высоковольтной блокировки. При этом отключение высоковольтной блокировки должно проверяться нажатием и

отпуская кнопку блокировки. В последнем положении прибор вакуумметр не должен давать показаний.

При наличии избыточного давления в отсеке, узле или системе разъединять или подтягивать соединения для устранения течи запрещается.

## **7.2 Меры безопасности при работе со сжатыми газами**

При работе со сжатыми газами запрещается:

- устранять какие-либо неисправности составных частей и трубопроводов, находящихся под давлением;
- превышать рабочее давление, установленное для данного трубопровода;
- проводить выдачу сжатых газов без контроля давления по манометру;
- пользоваться средствами измерений давления с разбитыми стеклами или просроченными сроками поверки;
- пользоваться арматурой, технический ресурс которой выработан;
- снимать заглушки со штуцеров арматуры и трубопроводов, находящихся под давлением;
- устанавливать металлорукава, изогнутые или скрученные вокруг своей оси;
- присутствие людей в зоне выхода воздушной струи при продувке трубопроводов;
- использовать баллоны, у которых истек срок периодического технического освидетельствования, отсутствуют установочные клейма, поврежден корпус (трещины, заметная коррозия, изменение формы);
- трубопроводы и баллоны должны иметь цветовую маркировку в соответствии с применяемым сжатым газом;
- на трубопроводах указывается направление движения рабочего тела в виде стрелок;
- на штурвалах ручного привода запорной арматуры наносится направление вращения ЗАКР., ОТКР.

При работе с гелием и азотом следует помнить, что при утечках в результате насыщения окружающего воздуха гелием или азотом у персонала может возникнуть кислородная недостаточность, опасная для жизни (ГОСТ 12.1.005-76).

При появлении признаков кислородного голодания у пострадавшего его необходимо эвакуировать из помещения, освободить от стесняющей одежды и давать нюхать нашатырный спирт, при отсутствии дыхания – делать искусственное дыхание и вызвать врача.

К работе с системой зарядки сжатыми газами допускаются лица, прошедшие курс обучения, аттестацию в квалификационной комиссии и инструктаж по безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

### **7.3 Меры безопасности при работе с жидким азотом**

Жидкий азот, используемый при работе, должен соответствовать требованиям ГОСТ 9293-74. Категорически запрещается использовать жидкий кислород вместо жидкого азота. Хранить и транспортировать жидкий азот разрешается только в сосудах Дьюара или предназначенных для этого криогенных резервуарах.

Переливать жидкий азот следует в заправленных под рукава брезентовых, суконных или кожаных перчатках и защитных очках с боковыми щитками. Верхняя одежда должна быть наглухо закрыта, а брюки должны перекрывать обувь. При заполнении стеклянных сосудов жидким азотом следует избегать попадания жидкости на края стеклянного сосуда. Запрещается выливать жидкий азот на пол помещений. При случайном проливе жидкого азота необходимо проветрить помещение. Для слива жидкого азота должны быть предусмотрены специально отведенные для этого места. Места для слива жидкого азота должны содержаться в чистоте и не иметь горючего покрытия.

Запрещается использовать сосуды Дьюара, на поверхности которых появился иней или “снеговая шуба”. В этом случае необходимо удалить жидкий азот из сосуда, поставить его на обогрев в течение суток в помещение, вход в

которое посторонним лицам запрещается. Сосуд заменить новым сосудом, взятым из комплекта ЗИП.

#### **7.4 Меры безопасности при работе с вакуумными насосами**

1. Для защиты от прикосновения к движущимся деталям насоса устанавливают защитное ограждение или предохранительное устройство в соответствии с ГОСТ Р 51342 и ГОСТ ИСО/ТО 12100-2.

Защитное ограждение считается пригодным, если предотвращает контакт с движущимися деталями насоса. Для проверки достаточности расстояния от опасных частей насоса следует использовать щуп доступности.

Защитные ограждения и предохранительные устройства должны соответствовать следующим требованиям:

- иметь устойчивую конструкцию;
- не вызывать дополнительного риска получения травмы;
- не быть легко проигнорированными или устраненными обслуживающим персоналом;
- быть расположенными на достаточном расстоянии от опасной зоны;
- представлять собой минимальные препятствия для наблюдения за работой насоса;
- позволять выполнять работу по наладке насоса, вакуумной системы, а также по текущему обслуживанию путем ограничения доступа только к тем участкам, где должна быть проведена работа, по возможности без демонтажа защитных ограждений и предохранительных устройств.

2. Доступные части насоса, вакуумной системы не должны иметь режущих кромок, острых углов и шероховатых поверхностей, способных нанести травму обслуживающему персоналу. Для предотвращения травм необходимо на краях листов металла удалить заусенцы, края отбортовать или скруглить.

3. Если постоянное защитное ограждение можно установить только после окончательной установки и подключения насоса, вакуумной системы, то необходимо предусмотреть временное защитное устройство, исключаящее

попадание инородных предметов в насос (например, глухой фланец на входном патрубке, если есть другой доступ к механической части насоса).

4. Детали насоса, вакуумной системы должны обладать достаточной прочностью на протяжении всего срока эксплуатации насоса, вакуумной системы. Если нельзя исключить опасность разрушения насоса, вакуумной системы, то в этих местах необходимо установить защитные ограждения с целью предохранения от выбрасываемых фрагментов и частиц деталей.

5. Конструкция насоса, вакуумной системы должна предотвращать забивание и сужение трубопроводов вследствие накопления отложений откачиваемых веществ. Конструкция насоса, вакуумной системы должна содержать элементы, позволяющие производить его разборку и чистку.

Выходные фильтры насоса, вакуумной системы должны обладать достаточной емкостью с тем, чтобы насос мог надежно работать в режиме максимальной производительности.

Насос, вакуумная система должны обеспечивать предотвращение повышения рабочего давления выше максимально допустимого в случае заполнения или забивания фильтра.

Если в процессе работы невозможно предотвратить образование отложений в выходной трубе насоса, вакуумной системы, то необходимо установить устройство контроля давления или предохранительный клапан.

6. Для исключения возникновения неисправностей на впуске газа в насос, вакуумную систему необходимо устанавливать дублирующие предохранительные устройства, такие как затвор, клапан и т.д.

7. Конструкция насоса, вакуумной системы должна предусматривать наличие отсечных механических устройств для предотвращения обратного хода насоса после его отключения.

8. Конструкция насоса должна обеспечивать достаточную устойчивость при эксплуатации и вне эксплуатации, во время поломок его отдельных частей, которые можно было заранее предвидеть, а также во время испытаний.

Если требования испытаний насоса на устойчивость не выполняются, то нужно предусмотреть устройство, обеспечивающее требуемую устойчивость насоса.

9. Необходимо установить или описать в сопроводительных эксплуатационных документах по ГОСТ 2.601 (далее - руководстве по эксплуатации) устройства, предназначенные для безопасного транспортирования насоса.

В качестве подъемных устройств могут использоваться ручки, рымболты, петли или консоли и т.д.

10. Для исключения потери устойчивости насоса во время подъема при транспортировании подъемные устройства должны быть проверены, испытаны и соответствовать требованиям, установленным в нормативных документах на устройства конкретного вида.

11. С помощью применения ловушек, фильтров и т.д. необходимо свести к минимуму возможность утечки масла из насоса.

#### 1.1 Крионасосы (дополнение к 1).

1.1.1 Для предотвращения взрыва насоса в случае, если сконденсированные откачиваемые вещества освобождаются в закрытой вакуумной системе, в насосе необходимо установить устройство компенсации давления.

1.1.2 Для предотвращения выхода из строя материалов в результате колебаний температуры или образования трещин, возникающих при низкой температуре, необходимо, чтобы материалы, применяемые в насосе, обладали хорошими физико-механическими характеристиками для соответствующих условий эксплуатации.

1.1.3 Если вследствие неисправности насоса на какую-либо его деталь может действовать давление, превышающее максимально допустимое рабочее давление, то необходимо установить соответствующее устройство компенсации давления.

1.1.4 Если в результате отключения (отсоединения) холодного крионасоса от источника криогента или компрессора возникает опасное повышение давления, то необходимо установить устройство компенсации давления, которое будет снижать давление до безопасного значения.

1.2 Турбомолекулярные насосы (дополнение к 1).

1.2.1 Крепление ротора насоса на валу привода должно быть достаточно надежным, исключающим возможность произвольного отсоединения ротора.

1.2.2 Корпус насоса должен обладать достаточной прочностью, позволяющей сдерживать фрагменты и частицы разрушающегося ротора.

1.2.3 Элементы крепления насоса к системе должны быть достаточно прочными для того, чтобы выдержать внезапное блокирование ротора.

1.2.4 При выходе из строя системы охлаждения необходимо предусмотреть в конструкции насоса температурное реле, предназначенное для отключения электропитания насоса до того, как установится максимальная температура, вызывающая разрушение насоса.

## **7.5 Меры безопасности при выполнении работ с применением грузоподъемных механизмов и на высоте**

При эксплуатации грузоподъемных машин не должны нарушаться требования, изложенные в его паспорте и руководстве по эксплуатации.

Объекты где эксплуатируются краны, должны быть зарегистрированы в соответствии с Правилами регистрации объектов в государственном реестре опасных производственных объектов.

Лица, работающие с грузоподъемными средствами, должны быть аттестованы согласно Правилам устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных машин, кранов. Руководитель работ, крановщик, стропальщик должны иметь допуск к самостоятельной работе.

Работы по подъему и перемещению грузов грузоподъемными машинами и вручную выполнять под руководством руководителя работ. Грузоподъемные машины допускать к подъему и перемещению только тех грузов, масса которых не превышает грузоподъемность машин. К работе допускать грузоподъемные

машины, грузозахватывающие приспособления, прошедшие освидетельствование.

При проведении погрузочно-разгрузочных работ с применением грузоподъемных машин запрещается:

- 1) отвлекаться от выполнения своих обязанностей;
- 2) находиться под грузом на пути движения груза, а также на поднимаемом грузе.

При работе на высоте (свыше 1,8 м и более над уровнем пола без ограждения) запрещается:

- 1) перелезать через ограждения площадок и лестниц;
- 2) переходить по незакрепленным конструкциям и работать на них;
- 3) сбрасывать с высоты детали, инструмент, материалы.

Работать на высоте разрешается только с предохранительным поясом, который должен быть пристегнут к элементам металлоконструкций. Инструмент, используемый при работе на высоте, должен пристегиваться к предохранительному поясу.

При работе на площадках обслуживания предварительно следует убедиться в том, что на площадках отсутствуют посторонние предметы, поверхности площадок не имеют подтеков воды и масла.

#### **7.5.1 Основы техники безопасности при работе с кранами**

Работы с кранами относятся к работам повышенной опасности. Для обеспечения соблюдения правил техники безопасности предприятие-владелец кранов назначает ответственных лиц, в число которых входят:

- 1) работник по надзору за безопасной эксплуатацией грузоподъемных машин. Его обязанности — надзор за техническим состоянием машин, съемных грузозахватных приспособлений « тары, за состоянием подкрановых путей, за правильностью приемов работ, соблюдением правил личной безопасности, освидетельствование грузоподъемных машин, участие в аттестациях и проверке знаний работников, контроль за выполнением предписаний органов технадзора;

2) ответственный за исправное состояние грузоподъемных машин, обязанности которого состоят в обеспечении регулярных осмотров и ремонтов оборудования, наблюдении за выполнением машинистами кранов производственных инструкций, хранении технической документации на оборудование;

3) ответственный за безопасное перемещение грузов кранами (выделяют на каждом участке работ и в каждой смене). В его обязанности входит организация работ по обеспечению правильной установки кранов и допуска к работе персонала соответствующей квалификации, порядка и габаритов складирования грузов по применению съемных грузозахватных приспособлений соответствующих типов и т. п.

### **7.5.2 Основы техники безопасности для рабочих люльки, находящейся на подъемнике (вышке)**

Для выполнения обязанностей рабочих люльки назначаются лица, прошедшие обучение, аттестацию в комиссии предприятия или учебном комбинате и получившие удостоверение в установленном порядке. Повторная проверка знаний проводится комиссией предприятия:

- 1) периодически, не реже одного раза в 12 месяцев;
- 2) при переходе с одного предприятия на другое;
- 3) по требованию инспектора госгортехнадзора или инженерно - технического работника по надзору за безопасной эксплуатацией подъемников.

Рабочие люльки должны иметь медицинское заключение, подтверждающее право на работу на высоте, и удостоверение.

Допуск рабочих люльки к работе на подъемнике должен оформляться приказом по предприятию с выдачей производственной инструкции (под расписку).

В случаях, когда зона обслуживания подъемником не видна с поста управления машиниста и нет радио- или телефонной связи между машинистом подъемника и находящимися в люльке рабочими, не имеющими права на управление движениями подъемника из люльки, для передачи сигналов лицо,

ответственное за безопасное производство работ подъемниками, должно назначить сигнальщика.

Сигнальщиком может быть назначен аттестованный стропальщик или рабочий люльки.

Число рабочих люльки определяется грузоподъемностью подъемника и площадью пола люльки (не менее 0,5 м<sup>2</sup> на человека). При назначении для работы на подъемнике двух и более рабочих люльки один из них должен быть назначен старшим.

### **7.6 Меры пожарной безопасности**

При работе в помещениях вакуумной станции необходимо соблюдать следующие меры пожарной безопасности:

- 1) иметь средства для тушения пожара и тщательно следить за его исправным состоянием;
- 2) не допускать утечки масла из насосов;
- 3) не допускать проливов при замене масла;
- 4) не допускать хранения легковоспламеняющихся жидкостей (спирт, бензин, масла, краски) на рабочем месте;
- 5) не допускать хранения отработанных протирочных материалов;
- 6) при попадании легковоспламеняющихся жидкостей на спецодежду, последнюю перед использованием необходимо тщательно просушить;
- 7) не допускать курения и применения открытого огня.

В случае возникновения пожара необходимо:

- 1) дать указание о снятии электропитания с составных частей системы;
- 2) вызвать пожарную команду;
- 3) приступить к тушению пожара имеющимися средствами.

### **7.7 Меры безопасности при работе с электрооборудованием**

Лица, работающие с электрооборудованием вакуумной станции, должны пройти медицинское освидетельствование и быть аттестованы на квалификационную группу по электробезопасности, в соответствии с требованиями руководящих документов.

Подавать напряжение на оборудование вакуумной станции и начинать работу разрешается только при исходном состоянии вакуумной станции по команде руководителя.

При работе с электрооборудованием вакуумной станции запрещается:

- 1) устранять неисправности электрооборудования, находящегося под напряжением;
- 2) касаться токоведущих частей и проводить их обтирку и чистку под напряжением;
- 3) снимать предупредительные плакаты;
- 4) устанавливать и снимать предохранители при поданном напряжении;
- 5) подсоединять и отсоединять кабели при поданном напряжении;
- 6) подключать в гнезда оголенные концы проводов;
- 7) использовать неисправные средства измерений и инструмент с поврежденной изоляцией.

Вращающиеся части электродвигателей должны иметь ограждение. Электроконструкции и оболочки экранированных кабелей должны быть надежно заземлены.

При оказании доврачебной помощи пострадавшему от электрического тока необходимо:

- 1) быстро принять меры по освобождению пострадавшего от действия электрического тока, при необходимости отключить от электрической сети часть установки, которой касается пострадавший;
- 2) вызвать врача;
- 3) уложить пострадавшего на спину на ровную и твердую поверхность;
- 4) распушить и расстегнуть одежду на пострадавшем и создать приток свежего воздуха;
- 5) если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но с сохранившимся устойчивым дыханием и пульсом, давать ему нюхать нашатырный спирт, обрызгать водой и обеспечить полный покой до прибытия врача.

Вывод по разделу: были сформулированы необходимые правила работы обслуживающего персонала, которые направлены на предотвращение травматизма и гибели рабочих, а также во избежание преждевременного выхода из строя дорогостоящего оборудования вакуумной установки. В разделе был рассмотрен весь перечень работ обслуживающего персонала. Он включает:

- общие положения по правилам и мерам безопасности при работе на вакуумной станции;
- правила безопасной работы при использовании масс-спектрометрического метода поиска негерметичности;
- меры безопасности при работе с вакуумными насосами;
- меры безопасности при работе со сжатыми газами
- меры безопасности при работе с жидким азотом;
- меры безопасности при работе с электрооборудованием;
- меры пожарной безопасности;
- меры безопасности при работе на высоте;
- меры безопасности при работах с применением грузоподъемных механизмов.

Для успешной работы и выполнения поставленной задачи, обслуживающему персоналу, необходимо и достаточно, строго выполнять все правила и требования настоящего раздела в полном объеме.

## 8 ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В экономической части дипломного проекта представлено экономическое обоснование проектирования крупногабаритной вакуумной установки вертикального типа.

Цель данной части дипломного проекта обосновать экономическую целесообразность проектирования вакуумной установки.

Для оценки экономической целесообразности разрабатываемого комплекса необходимо рассчитать затраты на проектирование вакуумной установки, затраты на приобретение материалов и комплектующих элементов, необходимых для проектирования и создание опытного образца.

При анализе целесообразности данную разработку следует рассматривать как некоммерческий продукт в том смысле, что она не предназначена для широкого тиражирования и продажи с целью получения прибыли.

### **8.1 Календарный план работы над проектированием вакуумной установки**

Жизненным циклом программы считается весь цикл от принятия решения о проведении разработок до полного отказа конечного пользователя от применения данного испытательного стенда.

В таблице 4 приведен план проведения работ.

Таблица 4 – План проведения работ

Основные виды работ	Исполнители	Затраты времени, дни
Разработка и утверждение технического задания	Инженер	1
Ознакомление с существующими методами вакуумных испытаний	Инженер	3
Разработка эскизного проекта	Инженер	6
Разработка геометрических моделей и чертежей	Инженер	10

Разработка маршрутной и операционной технологии изготовления изделия	Инженер	11
Подготовка технической документации	Инженер	2
Сдача результатов проектирования	Инженер	1
Итого:		24

## 8.2 Себестоимость проектирования вакуумной установки

Характерной чертой проводимых работ является их теоретическая направленность. В качестве конечного результата дипломного проектирования может рассматриваться прототип интеллектуальной системы, демонстрирующей возможности применения теоретических разработок и не предполагающей выход на рынок научно-технической продукции.

Следовательно, основными источниками затрат при работе над темой как части этапа проектирования жизненного цикла целенаправленной интеллектуальной системы являются капитальные предпроизводственные затраты, которые в свою очередь могут быть учтены и минимизированы.

В себестоимость проекта включаются все затраты, связанные с ее выполнением вне зависимости от источника ее финансирования. Калькуляция себестоимости составляется по статьям:

- 1) Основная и дополнительная заработная плата основных исполнителей.
- 2) Страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования.
- 3) Затраты на расходные материалы.
- 4) Прочие расходы.
- 5) Накладные расходы.

В таблице 5 указаны затраты на расходные материалы.

Таблица 5 – Затраты на расходные материалы

Наименование материала	Кол-во	Цена, руб.	Сумма затрат, в руб.
Канцелярские товары	-	-	700,00
Лицензионная версия MS Office 2020	1 шт.	3 562,50	3 562,50
AutoCAD 2020	1 шт.	9 325	9 325
Бумага для офисной техники	1 пачка	273,00	273,00
Тонер для принтера HP Laser Jet P1102	1 шт.	130,00	130,00
Итого:			13 990,50

В таблице 6 указана основная заработная плата разработчиков.

Таблица 6 – Основная заработная плата разработчиков

Наименование этапов	Исполнители	Трудо-емкость, чел/дн	Трудо-емкость, чел/мес*	Зарплата в мес., руб.	Затраты по зарплате, руб.
Разработка и утверждение технического задания	Инженер	1	0,045	12 130,00	545,85
Ознакомление с существующими методами вакуумных испытаний	Инженер	3	0,136	12 130,00	1 649,68
Разработка эскизного проекта	Инженер	6	0,272	12 130,00	3 299,36
Разработка геометрических моделей и чертежей	Инженер	10	0,454	12 130,00	5 507,02
Разработка маршрутной и операционной технологии изготовления	Инженер	11	0,5	12 130,00	6 065,00

Подготовка технической документации	Инженер	2	0,091	12 130,00	1 103,83
Сдача результатов проектирования	Инженер	1	0,045	12 130,00	545,85
Итого:					18 716,59

\*из расчета в месяце 22 рабочих дней.

Дополнительная заработная плата разработчиков составляет 20% от основной заработной платы и рассчитывается по следующей формуле:

$$\Phi_{\partial} = 20/100 \cdot \Phi_{oc} \quad (97)$$

$$\Phi_{\partial} = 0,2 \cdot 18\,716,59 = 3\,743,32 \text{ руб.}$$

Страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования составляют 30,2 % от фонда общей заработной платы разработчиков, и определяется по следующей формуле:

$$CB = 30,2/100 \cdot (\Phi_{oc} + \Phi_{\partial}) \quad (98)$$

$$CB = 0,302 \cdot (18\,716,59 + 3\,743,32) = 6\,782,89 \text{ руб.}$$

Накладные расходы составляют 180–250% от величины основной заработной платы разработчиков. В данном случае примем минимальное значение равное 180%. Таким образом, расчет накладных расходов осуществляется по формуле:

$$H_p = 180/100 \cdot \Phi_{oc} \quad (99)$$

$$H_p = 1,8 \cdot 18\,716,59 = 33\,689,86 \text{ руб.}$$

Прочие расходы включают стоимость машинного времени на проектирование вакуумной установки и подготовку технической документации и определяются по формуле:

$$Z_{np} = N \cdot C_{мч} \cdot K_{загр} \quad (100)$$

где  $N$  – количество часов, необходимых на проектирование вакуумной установки и подготовку технической документации,

$C_{мч}$  – стоимость машино-часа, включающая стоимость профилактических работ, потребляемой электроэнергии, расходных материалов, равная 54 рублей,

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

$N$  рассчитаем исходя из таблицы 6, учитывая дни затраченные на выполнение этапов, принимая, что каждый день работы длился 8 часов:

$$N = 192 \text{ часа,}$$

$$Z_{np} = 192 \cdot 54 \cdot 0,8 = 8\,294,4 \text{ руб.}$$

В таблице 7 указана себестоимость разработки ВК.

Таблица 7 – Себестоимость разработки вакуумной камеры

Наименование статей расходов	Затраты, руб.
Расходные материалы	13 990,50
Основная заработная плата разработчиков	18 716,59
Дополнительная заработная плата разработчиков	3 743,22
Страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования	6 782,89
Накладные расходы	33 689,86
Прочие расходы	8 294,40
Итого:	85 217,46

Для создания опытного образца необходимы комплектующие изделия, стоимость которых приведена в таблице 8.

Таблица 8 – Расходы на приобретение комплектующих изделий

Наименование изделия	Кол-во	Цена, руб.	Сумма, руб.
Вакуумная камера	1	108 552 408,00	108 552 408,00
Вакуумный насос НВЗ-500	5	1 006 000,00	5 030 000,00
Вакуумный насос ТМН-10000	4	550 000,00	2 200 000,00
Вакуумный насос HSR VELCO 900	3	850 200,00	2 550 600,00
Течеискатель ТИ1-50	1	1 435 000,00	1 435 000,00
Запорная арматура ЗВЭ-1000	2	768 154,78	1 536 310,00
Запорная арматура ЗВЭ-400	17	25 000,00	425 000,00
Ловушка ЛА-400	5	212 625,00	1 063 125,00
Вакуумметр ВДГ-1	2	18 800,00	37 600,00
Вакуумметр ВТСО-1	2	67 257,00	134 514,00
Вакуумметр ВМБ-14	3	47 700,00	143 100,00
Вакуумметр ВИ-14	3	84 314,52	252 943,00
Трубопровод	1	591 480,00	591 480,00
Итого:		123 952 080,00	

Затраты на основные материалы включают стоимость рабочего тела расходуемого в процессе подготовки и проведения испытаний.

В таблице 9 указаны затраты на основные материалы.

Таблица 9 – Затраты на основные материалы

Наименование материала	Объем, л.	Цена, л./руб.	Сумма затрат, руб.
Жидкий гелий	1000	1000,00	1 000 000,00
Жидкий азот	1000	100,00	100 000,00
Сжатый воздух	1000	24,50	24 500,00
Дизельное топливо	1000	47,49	47 490,00
Вакуумное масло ВМ-4	300	270,00	81 000,00

Гидравлическая жидкость	300	70,00	21 000,00
Итого:	1 273 990,00		

### 8.3 Оценка косвенного экономического эффекта

Косвенный экономический эффект от внедрения данной вакуумной установки заключается в том, что вакуумная установка является крупногабаритной и требует большого количества комплектующих изделий, материалов, оборудования, следовательно требует больших денежных затрат.

С внедрением данной вакуумной установки можно получить следующие выгоды:

- уменьшение рабочих мест обслуживающего персонала за счет автоматизации испытаний;
- уменьшение временных и материальных затрат на приемные испытания за счет полной сборки системы откачки заводом изготовителем;
- уменьшение временных затрат на подготовку данной системы, так как система откачки соединена с вакуумной камерой и готова к работе.

Вывод по разделу: экономической части выпускной квалификационной работы рассмотрены вопросы, связанные с обоснованием необходимости и целесообразности затрат на проектирование вакуумной установки. Были определены затраты на создание проекта, которые составили 85 217,46 рублей. Затраты на комплектующие элементы, необходимые для создания опытного образца, равны 123 952 080,00 рублей. Затраты на основные материалы, необходимые для проведения одного испытания, равны 1 273 990,00 рублей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной выпускной квалификационной работы, по теме «Проектная разработка крупногабаритной вакуумной установки для проведения проверок лунных долговременных обитаемых комплексов на воздействие внешней среды» был проведен следующий перечень подлежащих разработке разделов и этапов выполнения:

- Проектный расчет вакуумной системы, включающий в себя комплексный расчет газовых нагрузок системы, выбор вакуумной схемы и определение оптимальных размеров трубопроводов и элементов вакуумной системы;

- Описание установки, содержащее описание конструкции, выбор вакуумной камеры. Так же были выбраны соответствующие элементы системы от качки. Выбраны и описаны сопутствующие системы;

- Вакуумные испытания, заключающиеся в проведении:

- 1) Тепловакуумных испытаний, являющихся комплексными, поскольку на объект испытаний оказывается минимум два фактора – широкий диапазон температур и пониженное давление окружающего пространства;

- 2) Вакуумно-температурные испытания, заключающиеся в проверке работоспособности каких-либо узлов и механизмов в условиях реализации на элементах конструкции.

- Технологическая часть, содержащая:

- 1) Технологию проведения вакуумирования камеры;

- 2) Процесс вакуумирования.

Технология, описанная в разделе, приведена в виде алгоритма технологического процесса.

- Специальная часть, целью которой является:

- 1) Описание видов систем водяного охлаждения по критерию водоносности;

- 2) Расчет и выбор насоса системы водяного охлаждения.

В итоге выполнения специальной части выпускной квалификационной работы был полностью определен водяной одноступенчатый лопастной насос.

- Раздел безопасности жизнедеятельности, описывающий перечень пунктов по безопасной работе с вакуумной системой, нацеленный на предотвращение возникновения потенциально опасных ситуаций, несущих угрозу жизни и здоровью работников, задействованных при работе с системой;

- Организационно-экономическая часть, определяющая:

- 1) Календарный план проведения работ;
- 2) Себестоимость проектирования вакуумной установки;
- 3) Оценку косвенного экономического эффекта;

В разделе была проведена комплексная экономическая оценка и сделан вывод об экономической целесообразности разработки проекта установки.

В заключение выпускной квалификационной работы стоит отметить теоретическую, практическую и экономическую выгоду использования представленной вакуумной установки. Поскольку данная система является крупногабаритной, это дает широкие возможности для испытания как отдельных узлов, механизмов и агрегатов, работающих в условиях агрессивной окружающей среды космического вакуума, так и для испытания космических аппаратов и долговременных обитаемых комплексов целиком.

Спроектированная в рамках данной работы вакуумная установка обладает возможностью создания заданных значений вакуума в широком диапазоне давлений, это достигается за счет использования различных насосов. В результате имеется возможность проведения испытаний, результаты которых будут максимально приближены к реальным показателям космического пространства.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архаров А.М. Теория и расчет криогенных систем. / А.М. Архаров, И.В. Марфенина, Е.И. Микулин. – М. : Машиностроение, 1978. – 328 с.
2. Демихов К.Е. Вакуумная техника : справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2009. – 590 с.
3. Курашов В.И. Вакуумная техника средства откачки, их выбор и применение : учебное пособие / В.И. Курашов, М.Г. Фомина. – КГТУ, 1997. – 52 с.
4. Королев Б.М. Основы вакуумной техники. / Б.М. Королев, В.И. Кузнецов, А.И. Пипко. – М. : Энергия, 1971. – 392 с.
5. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. / Н.В. Кельцев. – Москва : Изд-во Химия 1976. – 512 с.
6. Нусинов М.Д. Имитационные установки. / М.Д. Нусинов – Москва : Изд-во Машиностроение, 1980. – 24 с.
7. Розанов Л.Н. Вакуумная техника / Л.Н. Розанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1990. – 320 с.
8. БТ-142-82 «Инструкция по технике безопасности при работе с баллонами со сжатыми, сжиженными и растворенными газами» – М.: НПО «Наука».
9. Фролов Е.С. Вакуумная техника : справочник. / Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев. – М. : Машиностроение, 1992. – 480 с.
10. Фролов Е.С. Механические вакуумные насосы. / Е.С. Фролов, В. И. Автономова. – М. Машиностроение, 1989. – 288 с.
11. Саксаганский Г.Л. Современные турбомолекулярные и электрофизические насосы. / Г.Л. Саксаганский – Москва : Изд-во ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1981 – 95 с.
12. Кузнецов В.И. Теория и расчет криогенных систем. / В.И. Кузнецов, И.В. Марфенина, Е.И. Микулин. – М.: Машиностроение, 1978. – 347 с.
13. Мелков М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники. / М.П. Мелков – Москва : Изд-во Энергия, 1973. – 234 с.

14. Микулин Е.И. Техника низких температур. / Е.И. Микулин – Москва : Изд-во Наука, 1980. – 356 с.

15. Мучин П.В. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие для вузов. / П.В. Мучин. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск : Изд-во СГУГиТ, 2003. – 276 с.

16. Мучин П.В. Охрана труда в организации: учебное пособие для руководителей и специалистов. / П.В. Мучин – Новосибирск : Изд-во СГУГиТ, 2005. – 120 с.