

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

Факультет инженерно-физический  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы  
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика  
Направленность (профиль) образовательной программы – Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зам.зав. кафедрой

  
В.В. Соловьев  
« 14 » 07 2020 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

на тему: Проектирование малогабаритной вакуумной установки горизонтально-го типа для экспериментальной отработки малых и сверхмалых космических аппаратов

Исполнитель  
студентка группы 617-об

  
10.07.2020  
(подпись, дата)

О.А. Гапоненко

Руководитель  
доцент, к.т.н.

  
10.07.20г.  
(подпись, дата)

А.В. Козырь

Консультант

  
(подпись, дата)

К.А. Насуленко

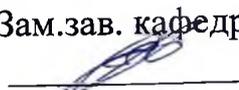
Нормоконтроль

  
10.07.20  
(подпись, дата)

М.А. Аревков

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

Факультет инженерно-физический  
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

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

### ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студентки Гапоненко Ольги Александровны

1. Тема выпускной квалификационной работы: Проектирование малогабаритной вакуумной установки горизонтального типа для экспериментальной отработки малых и сверхмалых космических аппаратов

(утверждена приказом от 14.04.2020 №711-уч)

2. Срок сдачи студентом законченного проекта: 14 июля 2020

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: рабочий объем камеры – 11,445 м<sup>3</sup>, длина цилиндрической части камеры – 4500 мм, диаметр камеры – 1800 мм, масса камеры 4490 кг, время откачки камеры 12ч, предельное остаточное давление – 7·10<sup>-8</sup> Па.

4. Содержание выпускной квалификационной работы: вакуумные установки и их назначение, проектный расчет вакуумной системы, описание системы, виды вакуумных испытаний, технология сверхвакуумной откачки, разработка контрольно-пропускного пункта, безопасность жизнедеятельности, экономическое обоснование разработки и внедрения вакуумной установки для испытания малых космических аппаратов.

5. Перечень материалов приложения: общий вид, схема членения, пневмогидравлическая схема, сетевой график, конструктивно-компоновочная схема стенда, план контрольно-пропускного пункта, общий вид КПП, внешний вид здания КПП, дорога возле КПП.

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

7. Дата выдачи задания: 20 марта 2020г

Руководитель выпускного квалификационного проекта: Козырь А.В.

Задание принял к исполнению (дата):

20 03 2020 

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 97 страницы, 18 рисунков, 11 таблиц, 12 источников.

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

Цель работы – проектная разработка вакуумной камеры горизонтального типа для экспериментальной отработки малых и сверхмалых космических аппаратов.

Задачи:

- 1) Провести проектный расчет вакуумной системы;
- 2) Составить описание установки;
- 3) Описать виды вакуумных испытаний;
- 4) Описать технологию проведения вакуумных испытаний;
- 5) Описать меры безопасности при проведении работ на вакуумной станции;
- 6) Экономически обосновать разработку и использование вакуумной установки.

## СОДЕРЖАНИЕ

1 ВАКУУМНЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ .....	7
2 ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ .....	11
2.1 Расчет величины потока газов, поступающего в вакуумную систему .....	11
2.2 Выбор вакуумной схемы установки.....	18
2.3 Выбор вакуумных насосов .....	19
2.3.1 Выбор сверхвысоковакуумного насоса .....	19
2.3.2 Выбор высоковакуумного насоса.....	21
2.3.3 Выбор насоса объемного действия.....	22
2.4 Определение конструктивных размеров трубопроводов и выбор элементов вакуумной системы .....	24
2.4.1 Сверхвысоковакуумная система.....	24
2.4.2 Высоковакуумная система .....	31
2.4.3 Область среднего и низкого вакуума .....	38
3 ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ .....	46
3.1 Вакуумная камера .....	47
3.2 Система откачки.....	48
3.2.1 Золотниковый (плунжерный) насос .....	48
3.2.2 Турбомолекулярный насос.....	50
3.2.3 Криогенный насос .....	51
3.2.4 Форвакуумная азотная ловушка (ЛАФ).....	52
3.2.5 Вакуумные трубопроводы.....	54
3.2.6 Запорно-регулирующая аппаратура .....	55
3.2.7 Манометрические преобразователи .....	56
3.3 Система разгерметизации.....	57
3.4 Система управления, измерения и контроля.....	57

3.5 Гелиевый течеискатель ТИ1-50 .....	58
3.6 Транспортировочные контейнеры.....	59
3.7 Седельный тягач.....	61
3.8 Запасные части, инструменты и принадлежности.....	62
4 ВИДЫ ВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ .....	64
5 ТЕХНОЛОГИЯ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ .....	72
6. РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ПРОПУСКНОГО ПУНКТА .....	75
7 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ .....	78
7.1 Меры безопасности при проведении работ на вакуумной станции .....	78
7.1.1 Общие правила безопасности труда.....	79
7.1.2 Основные требования охраны труда при проверке масс-спектрометрическим методом .....	80
7.2 Меры безопасности при работе со сжатыми газами .....	81
7.3 Меры безопасности при работе с жидким азотом .....	81
7.4 Меры безопасности при работе с электрооборудованием.....	82
7.5 Меры пожарной безопасности.....	83
7.6 Меры безопасности при выполнении подъемно-перегрузочных работ и на высоте .....	84
8 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ .....	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	93
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	95

## ВВЕДЕНИЕ

Все компоненты и узлы космических аппаратов и спутников должны тестироваться их перед вводом в эксплуатацию. Чтобы обеспечить готовность этих систем перед их запуском в космос, они должны подвергаться воздействию вакуума и температуры, чтобы гарантировать работу в этих суровых условиях без сбоев. Для этого используются установки имитации космического пространства.

Имитатор космического пространства (его еще называют «космический имитатор» или «термобарокамера», встречается также название «имитатор космоса») представляет собой изначально вакуумную камеру с системой вакууммирования и поддержания заданного вакуума, оснащенную системой регулирования температуры объекта испытания и различными вспомогательными системами.

*Вакуумные камеры* – изначально предназначены для испытаний космических аппаратов и их частей, работающих в условиях открытого космоса с характерным разряжением в камере до  $10^{-6}..10^{-7}$  мБар.

## 1 ВАКУУМНЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

Имитатор космического пространства (его еще называют «космический имитатор» или «термобарокамера», встречается также название «имитатор космоса») представляет собой изначально вакуумную камеру с системой вакууммирования и поддержания заданного вакуума, оснащенную системой регулирования температуры объекта испытания и различными вспомогательными системами. На наш взгляд принципиальная разница определяется глубиной вакуума и областью применения.

*Термобарокамеры* – обычно рассчитаны для проведения испытаний авиационной и атмосферной ракетной техники с глубиной разряжения в процессе испытания не лучше 1 мБар (ок. 1мм.рт.ст).

*Имитаторы космического пространства* – изначально предназначены для испытаний космических аппаратов и их частей, работающих в условиях открытого космоса с характерным разряжением в камере до  $10e^{-6}..10e^{-7}$  мБар.

Рассмотрим несколько типов вакуумных камер.

### 1. Колпаковые вакуумные камеры



Рисунок 1.1 – Колпаковая вакуумная камера

Данный тип камер получил распространение в лабораторных установках, где необходимо частое и удобное открывание камеры путем подъема крышки (колпака) камеры. Камера может быть снабжена системой электро-механического подъема колпака.

## 2. Цилиндрическая вакуумная камера



Рисунок 1.2 – Цилиндрическая вакуумная камера

Наиболее распространенное решение. Данное исполнение – оптимальное соотношение массы камеры к ее объёму при сохранении высокой технологичности. В зависимости от требований камера может иметь одну или две распашных или откатных дверцы.

## 3. Кубическая вакуумная камера



Рисунок 1.3 – Кубическая вакуумная камера

Данный тип камер имеет наиболее удобный доступ внутрь камеры. Также они удобны для использования в помещениях с ограниченным пространством.

#### 4. Камера с D-образной формой

Данный тип камер получил распространение в напылительных установках. Данный конструктив совмещает в себе удобный доступ в камеру и малый занимаемый объём.

#### 5. Вертикальные камеры со съёмной крышкой



Рисунок 1.4 – Вертикальная камера со съёмной крышкой

Данные камеры предназначены для вертикальной загрузки объектов, имеющих большие габаритные размеры и располагаемых в процессе испытаний вертикально. Крышка может открываться автоматически или вручную по средствам кран-балки. Кроме того, данный тип камер может быть многосекционный, что позволяет унифицировать камеры под различные задачи.

Прежде всего, вакуумные камеры необходимы для повышения надежности космического аппарата. Для обеспечения надежности и безотказности ракет-носителей и КА первостепенное значение имеют комплексные наземные испытания с имитацией воздействия на объект реальных факторов кос-

мического пространства, к числу которых относятся прежде всего низкое давление и температура, изменяющаяся от  $-270^{\circ}\text{C}$  на теневой стороне, до  $180\text{--}450^{\circ}\text{C}$  на солнечной стороне орбиты КА. В результате такие факторы качественно изменяют характер «поведения» традиционных материалов в космосе.

## 2 ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

### 2.1 Расчет величины потока газов, поступающего в вакуумную систему

Исходные данные:

$$T = 180 \text{ [}^\circ\text{C]};$$

$$P_0 = 10^5 \text{ [Па]};$$

$$P_k = 10^{-7} \text{ [Па]};$$

$$t_{пред} = 180 \text{ [мин]};$$

$$t_{откач} = 12 \text{ [час]}.$$

Исходя из заданного давления  $p=10^{-7}$  [Па], выбираем в качестве основного насоса турбомолекулярный насос, для нормальной работы которого необходимо предварительное разрежение порядка 1 [Па].

Для работы в области среднего и низкого вакуума выбирается механический золотниковый насос с предельным давлением 1 [Па].

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

Расчет суммарного потока газа:

$$Q_{\Sigma} = Q_{изд} + Q_{нат} + Q_{газ}, \quad (2.1)$$

Определим поток газов  $Q_{изд}$ , выделяющихся из изделий:

$$Q_{изд} = Q_{алюм} + Q_{крем}, \quad (2.2)$$

где  $Q_{алюм}$  – поток газов, который выделяется из алюминиевого корпуса КА,  $Q_{крем}$  – поток газов, который выделяется из солнечных панелей.

$$Q_{алюм} = q_{алюм} \cdot A_{алюм}, \quad (2.3)$$

$$Q_{крем} = q_{крем} \cdot A_{крем}, \quad (2.4)$$

где  $q_{алюм} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})]$ ;

$q_{крем} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})]$ .

$$A_{крем} = 2 \cdot 4 \cdot L_{бат} \cdot l_{бат}, \quad (2.5)$$

где  $L_{бат} = 160 \text{ [см]}$  – длина секции солнечной батареи;

$l_{бат} = 113 \text{ [см]}$  – ширина секции солнечной батареи.

$A_{крем} = 2 \cdot 4 \cdot 1,6 \cdot 1,13 = 14,464 \text{ [м}^2]$ .

$$A_{алюм} = 2 \cdot l_{изд} \cdot h_{изд} + 4 \cdot L_{изд} \cdot h_{изд}, \quad (2.6)$$

где  $L_{изд} = 1,5 \text{ [м]}$  - длина шасси КА;

$l_{изд} = 1,1 \text{ [м]}$  - ширина шасси КА;

$h_{изд} = 1,1 \text{ [м]}$  - высота шасси КА.

$A_{алюм} = 2 \cdot 1,1 \cdot 1,1 + 4 \cdot 1,5 \cdot 1,1 = 9,02 \text{ [м}^2]$ .

$Q_{алюм} = 6 \cdot 10^{-6} \cdot 9,02 = 0,541 \cdot 10^{-4} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}]$ ;

$Q_{крем} = 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 14,464 = 0,347 \cdot 10^{-4} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}]$ ;

$Q_{изд} = 0,541 \cdot 10^{-4} + 0,347 \cdot 10^{-4} = 0,888 \cdot 10^{-4} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}]$ ;

Окончательно после приведения к комнатной температуре:

$Q_{изд} = 0,888 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{293}{453} = 0,574 \cdot 10^{-4} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}]$ .

Произведем расчет величины газового потока, через неплотности, в узлах соединения камеры, полагая число возможных мест натекания равным  $n = 15$ . Проверка осуществляется масс–спектрометрическим течеискателем ТИ1-50 с чувствительностью  $\gamma = 7 \cdot 10^{-13} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}]$ .

$$Q_{нат} = n \cdot \gamma, \quad (2.7)$$

$$Q_{нат} = 15 \cdot 7 \cdot 10^{-13} = 1,05 \cdot 10^{-11} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па/с].}$$

Произведем расчет величины  $Q_{газ}$  выделяющихся с поверхностями элементов:

$$Q_{газ} = \sum_i A_i \cdot q_i, \quad (2.8)$$

где  $A_i$  – площадь поверхности  $i$  – го элемента обращенного в ВК,  
 $q_i$  – скорость удельного газовыделения с поверхности материала при комнатной температуре.

На рисунке 2.1 изображена зависимость скорости удельного газовыделения резин различных марок от степени их прогрева.

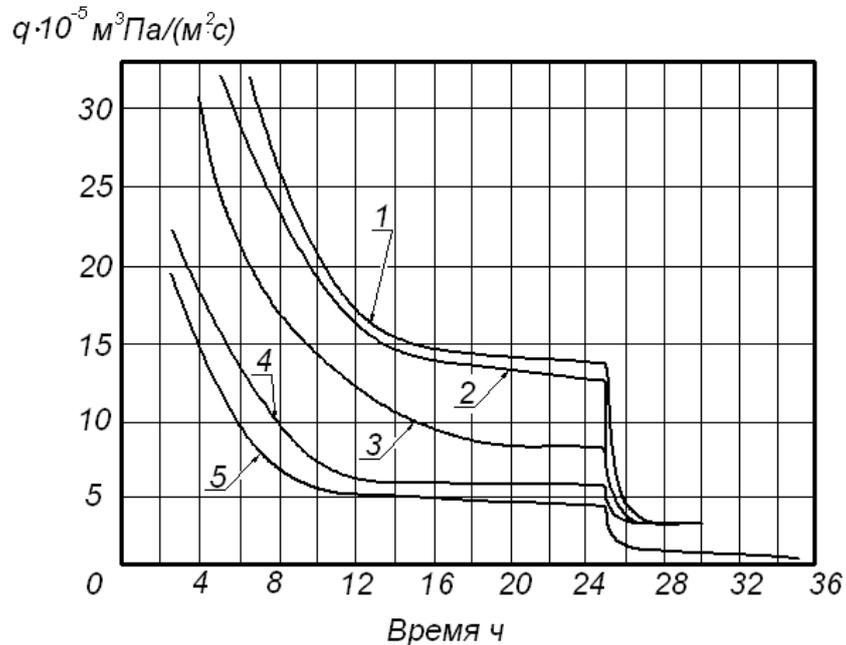


Рисунок 2.1 – Зависимость скорости удельного газовыделения  $q$  резин различных марок от времени их прогрева.

1 – резина 1015 при 350 [К]; 2 – резина 9024 при 350 [К]; 3 – резина 14P-23 при 473 [К]; 4 – резина 14P-2 при 420 [К]; 5 – резина 7889 при 340 [К]

Примем, что все конструктивные элементы выполнены из нержавеющей стали, а резиновые уплотнители из резины марки 7889. Из рисунка 1 для резины марки 7889  $q_{резин\ упл} = 5 \cdot 10^{-5}$  [ $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ].

Для нержавеющей стали  $q_{корн} = q_{крыш} = q_{подст} = q_{днища} = 1,2 \cdot 10^{-8}$  [ $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ].

В качестве теплоизоляционного материала предполагается использование теплоизоляционных матов АТМ-3, покрываемых алюминиевой фольгой.

Для алюминиевого покрытия экрана  $q_{экран(Al)} = 6 \cdot 10^{-6}$  [ $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ].

Для уменьшения газовой выделений в объеме камеры, в качестве нагревателей, используемых для имитации солнечного излучения и рассеянного излучения от Земли, будем использовать галогенные лампы КГ 220-1000-1 диаметром 11 [мм] и длиной 375 [мм]. Газовой выделением таких ламп можно пренебречь.

Для стекла П-15  $q_{стекла} = 4,65 \cdot 10^{-1}$  [ $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ].

$$Q_{газ} = Q_{корн} + Q_{крыш} + Q_{подст} + Q_{экран(Al)} + Q_{днища} + Q_{резин\ упл} + Q_{стекла} \quad (2.9)$$

$$Q_{корн(обеч)} = \pi \cdot D \cdot L \cdot q_{корн}, \quad (2.10)$$

где  $D=1,8$  [м] – диаметр камеры, ограниченный габаритными размерами 20-ти тонного транспортировочного контейнера, выпускаемого промышленностью;

$L=4,5$  [м] – длина камеры.

$$Q_{корн(обеч)} = 3,14 \cdot 1,8 \cdot 4,5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,305 \cdot 10^{-6} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}].$$

$$Q_{корн(штуц1)} = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot h_1 \cdot q_{корн}, \quad (2.11)$$

где  $d=0,8$  [м] – диаметры штуцеров, свариваемых в камеру для установки смотровых окон;

$h_I=0,2$  [м] – длина штуцеров.

$$Q_{\text{корн(штуц1)}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 0,2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,012 \cdot 10^{-6} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па /с]}.$$

Газовыделения с коммутационных штуцеров рассчитаем по формулам (2.12), (2.13), (2.14).

$$Q_{\text{корн(штуц2)}} = \pi \cdot d_1 \cdot h_2 \cdot q_{\text{корн}}, \quad (2.12)$$

$$Q_{\text{корн(штуц3)}} = \pi \cdot d_2 \cdot h_2 \cdot q_{\text{корн}}, \quad (2.13)$$

$$Q_{\text{корн(штуц4)}} = \pi \cdot d_3 \cdot h_2 \cdot q_{\text{корн}}, \quad (2.14)$$

$$Q_{\text{крыш(эл)}} = \pi D(h_1 + 0,345 \cdot D) \cdot q_{\text{крыш}}, \quad (2.15)$$

$$Q_{\text{корн(штуц2)}} = 3,14 \cdot 0,25 \cdot 0,5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,471 \cdot 10^{-8} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па /с]}.$$

$$Q_{\text{корн(штуц3)}} = 3,14 \cdot 0,2 \cdot 0,5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,377 \cdot 10^{-8} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па /с]}.$$

$$Q_{\text{корн(штуц4)}} = 3,14 \cdot 0,15 \cdot 0,5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,283 \cdot 10^{-8} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па /с]}.$$

где  $h_I=25$  [мм] – отбортовка крышек и днищ согласно ГОСТ 6533-78;

$D=1,8$  [м] – диаметр камеры.

$$Q_{\text{крыш(эл)}} = 3,14 \cdot 1,8 \cdot (0,025 + 0,345 \cdot 1,8) \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,044 \cdot 10^{-6} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па /с]}.$$

$$Q_{\text{подст}} = \left( \pi \cdot \frac{D_1^2}{4} + \pi \cdot D_1 \cdot L_1 \right) \cdot q_{\text{подст}}, \quad (2.16)$$

где  $D_I=1,56$  [м] – диаметр КА;  $L_I=1,5$  [м] – длина КА.

$$Q_{\text{подст}} = \left( 3,14 \cdot \frac{1,56^2}{4} + 3,14 \cdot 1,56 \cdot 1,5 \right) \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,11 \cdot 10^{-6} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па /с]}.$$

$$Q_{\text{экр(Al)}} = (2\pi D(h_1 + 0,345 \cdot D) + \pi DL) \cdot q_{\text{экр}}, \quad (2.17)$$

где  $h_1=25$  [мм] – отбортовка крышек и днищ согласно ГОСТ 6533-78;

$D=1,8$  [м] – диаметр камеры;  $L=4,5$  [м] – длина камеры.

$$Q_{\text{экрн(А1)}} = (2 \cdot 3,14 \cdot 1,8 \cdot (0,025 + 0,345 \cdot 1,8) + 3,14 \cdot 1,8 \cdot 4,5) \cdot 6 \cdot 10^{-6} = 1,964 \cdot 10^{-4} [\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}].$$

$$Q_{\text{днища}} = \pi D (h_1 + 0,345 \cdot D) \cdot q_{\text{днища}}, \quad (2.18)$$

где  $h_1=25$  [мм] – отбортовка крышек и днищ согласно ГОСТ 6533-78;

$D=1,8$  [м] – диаметр камеры.

$$Q_{\text{днища}} = 3,14 \cdot 1,8 \cdot (0,025 + 0,345 \cdot 1,8) \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,044 \cdot 10^{-6} [\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}].$$

Газовыделение резинового уплотнителя крышки камеры рассчитаем по формуле (2.19):

$$Q_{\text{резин.упл1}} = \pi \cdot D \cdot h_{n1} \cdot q_{\text{резин.упл}}, \quad (2.19)$$

где  $D$  – диаметр камеры;  $h_{n1}$  – толщина уплотнителя.

$$Q_{\text{резин.упл1}} = 3,14 \cdot 1,8 \cdot 0,01 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 2,826 \cdot 10^{-6} [\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}].$$

Газовыделение резинового уплотнителя смотрового окна камеры рассчитаем по формуле (2.20):

$$Q_{\text{резин.упл2}} = \pi \cdot d_1 \cdot h_{n2} \cdot q_{\text{резин.упл}}, \quad (2.20)$$

где  $d_1$  – диаметр штуцера;  $h_{n2}$  – толщина уплотнителя.

$$Q_{\text{резин.упл2}} = 3,14 \cdot 0,8 \cdot 0,004 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,502 \cdot 10^{-6} [\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}].$$

Газовыделение резиновых уплотнителей коммутационных штуцеров камеры рассчитаем аналогично газовыделению уплотнителя смотрового окна по формулам (2.21), (2.22), (2.23):

$$Q_{\text{резин.упл3}} = \pi \cdot d_2 \cdot h_{n2} \cdot q_{\text{резин.упл}}, \quad (2.21)$$

$$Q_{\text{резин упл3}} = 3,14 \cdot 0,25 \cdot 0,004 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,157 \cdot 10^{-6} [\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}].$$

$$Q_{\text{резин упл4}} = \pi \cdot d_3 \cdot h_{n2} \cdot q_{\text{резин.упл}}, \quad (2.22)$$

$$Q_{\text{резин упл4}} = 3,14 \cdot 0,2 \cdot 0,004 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,126 \cdot 10^{-6} [\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}].$$

$$Q_{\text{резин упл5}} = \pi \cdot d_4 \cdot h_{n2} \cdot q_{\text{резин.упл}}, \quad (2.23)$$

$$Q_{\text{резин упл5}} = 3,14 \cdot 0,15 \cdot 0,004 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,094 \cdot 10^{-6} [\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}].$$

$$Q_{\text{стекла}} = \pi \frac{d_5^2}{4} q_{\text{стекла}}, \quad (2.24)$$

где  $d_5$  – диаметр смотрового окна.

$$Q_{\text{стекла}} = 3,14 \cdot \frac{0,8^2}{4} \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 0,251 \cdot 10^{-6} [\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}].$$

$$Q_{\Sigma} = 2,583 \cdot 10^{-4} [\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}].$$

Проверим возможность использования механического насоса АВЗ-20Д для предварительной откачки рабочей камеры, имеющей объем  $V = 11,445 [\text{м}^3]$ , за время  $t = 180 [\text{мин}]$ . Считаем, что предварительная откачка должна идти до давления 1 [Па].

Рассчитаем время предварительной откачки рабочей камеры. По формуле (25) с учетом того, что для механических насосов коэффициент использования насоса  $\nu = 1,1 \div 1,25$ , получим:

$$S_0 = \frac{S_H}{\nu} = \frac{0,02}{1,25} = 0,016 [\text{м}^3 / \text{с}]. \quad (2.25)$$

Тогда

$$t = \frac{V}{S_o} \cdot \ln \left( \frac{p_{нач} - Q_{\Sigma}' / S_o}{p - Q_{\Sigma}' / S_o} \right), \quad (2.26)$$

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

$$t = \frac{11,445}{0,016} \ln \frac{10^5 - \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{0,016}}{1 - \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{0,016}} = 8247 \text{ [с]}.$$

Таким образом, полученное время предварительной откачки меньше заданного.

## 2.2 Выбор вакуумной схемы установки

Исходные данные:

Суммарный газовый поток  $Q = 2,583 \cdot 10^{-4}$  [ $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ ];

Давление в вакуумной системе  $p = 10^{-7}$  [Па];

Размеры откачиваемого объекта:  $d_0 = 1800$  [мм];

$L=4500$  [мм].

Длины участков вакуумной системы:

$l_1 = 1500$  [мм];

$l_2 = 1500$  [мм];

$l_3 = 1500$  [мм];

$l_4 = 1500$  [мм];

$l_5 = 1500$  [мм].

На рисунке 2.2 изображена схема вакуумной системы.

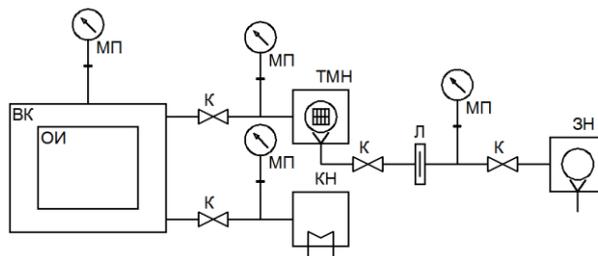


Рисунок 2.2 – Схема вакуумной системы

## 2.3 Выбор вакуумных насосов

### 2.3.1 Выбор сверхвысоковакуумного насоса

В соответствии с дополнительным условием для сверхвысоковакуумной откачки выбираем криогенные насосы серии Cryo-Plex с предельным давлением  $p_{нрл}=7 \cdot 10^{-8}$  [Па] и диапазоном быстродействия по воздуху от 1,5 до 5,0 [м<sup>3</sup>/с].

Удельная быстрота откачки и предельное остаточное давление криогенного насоса могут быть рассчитаны на основе метода баланса потоков газа, конденсирующегося на холодной поверхности и испаряющегося с него (2.27):

$$S_{н.уд} = 36,4 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{T_1}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{\alpha_u p_{нас}}{\alpha p} \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{2}}\right), \quad (2.27)$$

где  $p$  и  $T_1$  – давление и температура газа, падающего на холодную поверхность, [Па] и [K];

$p_{нас}$  – давление насыщенного пара сконденсированного газа при температуре холодной поверхности  $T_2$ , [Па];

$M$  – молярная масса газа;

$\alpha = 0,1$  – коэффициент прилипания;

$\alpha_u$  – отношение количества газа, испаряющегося с 1 [м<sup>2</sup>] холодной поверхности за 1 [с], к количеству газа, которое теоретически должно было испаряться в равновесных условиях.

Предельное остаточное давление  $p_{ост}$  определяется как давление, при котором  $S_{н.уд} = 0$  (2.27):

$$p_{ост} = \frac{\alpha_u}{\alpha} p_{нас} \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.28)$$

Выражение (2.27) можно переписать в виде:

$$S_{н.уд} = S_0 \left( 1 - \frac{p_{ост}}{p} \right), \quad (2.29)$$

где  $S_0 = 36,4 \cdot \alpha \cdot \left( \frac{T_1}{M} \right)^{\frac{1}{2}}$ .

Тогда

$$S_{н.уд} = 36,4 \cdot 0,1 \cdot \left( \frac{453}{29} \right)^{\frac{1}{2}} \left( 1 - \frac{7 \cdot 10^{-8}}{10^{-7}} \right) = 4,32 \text{ [м}^3\text{/(м}^2 \cdot \text{с)]},$$

$$S_n = S_{н.уд} \cdot k_{и1}, \quad (2.30)$$

где  $k_{и1}=0,5$  – коэффициент использования насоса.

$$S_n = 4,32 \cdot 0,5 = 2,16 \text{ [м}^3\text{/(м}^2 \cdot \text{с)]}.$$

Ближайший по скорости действия криогенный насос Cryo-Plex 10 имеет следующие характеристики:

Таблица 2.1 – Характеристики насоса Cryo-Plex 10

Быстрота действия, $S$ [м <sup>3</sup> /с]	3
Предельный вакуум, $p$ [Па]	$7 \cdot 10^{-8}$
Диаметр впускного патрубка, [мм]	320
Высота насоса, [мм]	607
Масса, [кг]	39

### 2.3.2 Выбор высоковакуумного насоса

В соответствии с дополнительным условием для высоковакуумной откачки выбираем турбомолекулярные насосы серии ТМН с предельным давлением  $p_{np2}=10^{-7}$  [Па] и диапазоном быстродействия от 0,1 до 18,0 [м<sup>3</sup>/с].

По графику на рисунке 1.3 для  $n=3$  находим при  $S_{эф2}=0,5$  [м<sup>3</sup>/с] оптимальное значение коэффициента использования  $k_{u2} = 0,3$ .

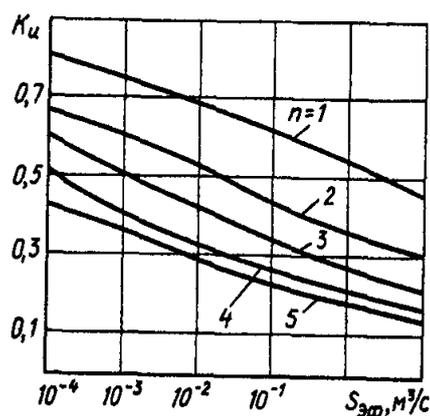


Рисунок 2.3 – Рекомендуемые коэффициенты использования высоковакуумных насосов в зависимости от эффективной скорости действия и числа элементов на участке от насоса до откачиваемого объекта

Для создания высокого вакуума выбирается турбомолекулярный насос ТМН-500 со следующими техническими характеристиками:

Таблица 2.2 – Характеристики насоса ТМН-500

Быстродействие, $S$ [м <sup>3</sup> /с]	0,5
Предельный вакуум, $p$ [Па]	$7 \cdot 10^{-8}$
Потребляемая мощность, $W$ [кВт]	0,8
Диаметр впускного патрубка, [мм]	260
Диаметр выпускного патрубка, [мм]	50
Масса, [кг]	210

### 2.3.3 Выбор насоса объемного действия

В соответствии с дополнительным условием для высоковакуумной откачки выбираем золотниковые насосы серии АВЗ с предельным давлением  $p_{np3}=0,07$  [Па] и диапазоном быстродействия от 0,02 до 0,185 [м<sup>3</sup>/с].

Рабочее давление механического насоса выбираем по максимальному выпускному давлению турбомолекулярного насоса с коэффициентом запаса  $\varphi = 2$ .

Тогда получим следующее выражение:

$$p_3 = p_{наиб}/\varphi, \quad (2.31)$$

где  $p_{наиб}=1$  [Па] – максимальное выпускное давление насоса ТМН-500.

$p_3 = 1/2 = 0,5$  [Па], что соответствует эффективной скорости откачки:

$$S_{эф3} = \frac{Q_{\Sigma}}{p_3}, \quad (2.32)$$

$$S_{эф3} = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{0,5} = 5,166 \cdot 10^{-4} \text{ [м}^3\text{/с]}.$$

По графику на рисунке 2 для  $n = 5$  находим при  $S_{эф3} = 5,166 \cdot 10^{-4}$  [м<sup>3</sup>/с] оптимальное значение коэффициента использования  $k_{уз} = 0,78$ .

Номинальная скорость действия механического насоса определяется по следующей формуле:

$$S_{н3} = \frac{Q_{\Sigma}}{k_{уз} p_3 - p_{np3}}, \quad (2.33)$$

где  $p_{np3}$  – предельное давление механических насосов.

$$S_{нз} = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{0,78 \cdot 0,5 - 0,07} = 8,072 \cdot 10^{-4} \text{ [м}^3\text{/с]}.$$

На рисунке 2.4 изображены рекомендуемые коэффициенты использования вращательных насосов.

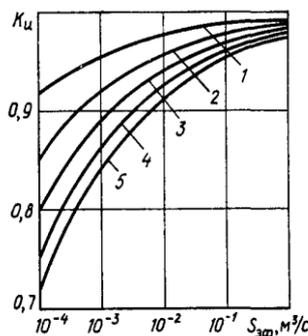


Рисунок 2.4 – Рекомендуемые коэффициенты использования вращательных насосов в низковакуумных системах в зависимости от эффективной скорости действия и числа элементов на участке от насоса до откачиваемого объекта

Ближайший по скорости действия золотниковый насос АВЗ-20Д имеет следующие характеристики:

Таблица 2.3 - Характеристики насоса АВЗ-20Д

Диаметр впускного патрубка, $d$ [мм]	40
Скорость действия, $S$ [м <sup>3</sup> /с]	0,02
Предельный вакуум, $p$ [Па]	0,07
Потребляемая мощность, $W$ [кВт]	2,2
Габаритные размеры:	
- длина, [м]	0,650
- ширина, [м]	0,400
- высота, [м]	0,665
Масса, [кг]	185

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

### 2.4.1 Сверхвысоковакуумная система

Найдем общую проводимость участка вакуумной системы от криогенного насоса до вакуумной камеры по формуле:

$$U_{01} = S_{н1} \frac{K_{u1}}{1 - K_{u1}}, \quad (2.34)$$

где  $S_{н1}$  – быстрота действия насоса, выбранного по каталогу.

$$U_{01} = 1,5 \frac{0,28}{1 - 0,28} = 0,58 \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

Составим компоновочную схему рассматриваемого участка вакуумной системы.

На рисунке 2.5 изображена схема участка сверхвысоковакуумной системы.

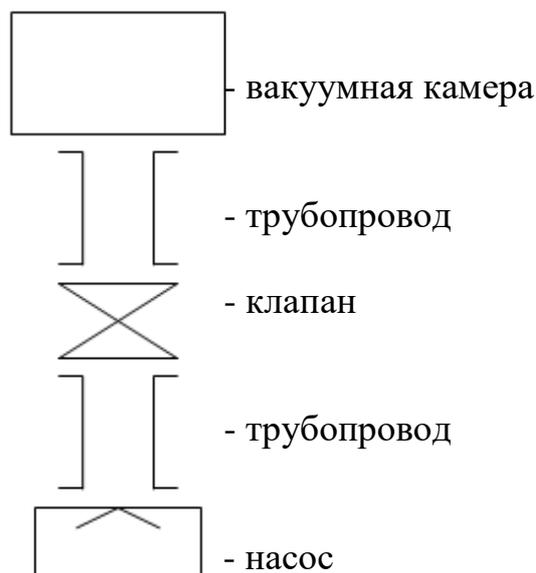


Рисунок 2.5 – Схема участка сверхвысоковакуумной системы

Определим проводимости элементов и диаметры трубопроводов. Будем считать в первом приближении, что все элементы имеют одинаковую проводимость.

Тогда общая проводимость участка будет равна:

$$U_{ij} = 3U_{01}, \quad (2.35)$$

$$U_{11} = 3 \cdot 0,58 = 1,75 \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

Режим течения газа в трубопроводе определяется по рабочему давлению  $p_1 = 7 \cdot 10^{-8}$  [Па] и диаметру входного патрубка насоса  $d_{ex} = 0,2$  [м].

Критерий Кнудсена определяется по формуле (2.36):

$$Kn = \frac{L}{d_{эф}} = \frac{L_1}{p_1 \cdot d_{ex}}, \quad (2.36)$$

$$Kn = \frac{1,5}{7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,2} = 1,07 \cdot 10^8 > 1,5 \text{ – режим течения молекулярный.}$$

Диаметр первого элемента может быть рассчитан из условия последовательного соединения входного отверстия и трубопровода:

$$\frac{1}{U_{11}} = \frac{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}}{91d_1^2} + \frac{l_1}{121d_1^3}, \quad (2.37)$$

где  $d_1$  – диаметр рассматриваемого элемента;

$d_0$  – диаметр предыдущего элемента;

$l_1$  – длина рассматриваемого элемента.

$$\frac{1}{1,029} = \frac{1 - \frac{d_1^2}{1,8^2}}{91d_1^2} + \frac{1,5}{121d_1^3};$$

$$117,59d_1^3 = \left(1 - \frac{d_1^2}{3,24}\right)1,33d_1 + 1,5;$$

$$117,59d_1^3 = 1,33d_1 - 0,41d_1^3 + 1,5;$$

$$118d_1^3 - 1,33d_1 - 1,5 = 0;$$

$$d_1^3 - 0,011d_1 - 0,013 = 0.$$

Определим корни уравнения

$$d_0 \approx 0,25071;$$

$$d_1 \approx -0,12535 - 0,19011i;$$

$$d_2 \approx -0,12535 + 0,19011i.$$

Два последних корня уравнения являются комплексными числами, т.е. в нашем случае являются посторонними.

По ГОСТ 18626 – 73 выбираем диаметр  $d_l = 250$  [мм]. Тогда проводимость первого участка рассчитывается по формуле (2.37) следующим образом:

$$\frac{1}{U_{11}} = \frac{1 - \frac{0,25^2}{1,8^2}}{91 \cdot 0,25^2} + \frac{1,5}{121 \cdot 0,25^3},$$

$$\frac{1}{U_{11}} = 0,965 \text{ [с/м}^3\text{]}.$$

Проводимость первого участка  $U_{11} = 1,036$  [м<sup>3</sup>/с].

Так как при последовательном соединении элементов с различными диаметрами в местах сужения проходного сечения возникают дополнительные сопротивления потоку газа,  $d_0 > d_1$ , следовательно, находим проводимость отверстия для молекулярного режима течения газа:

$$U_{отв} = 116 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (2.38)$$

$$U_{отв1} = 116 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} = 5,69 [\text{м}^3/\text{с}].$$

Проводимость отверстия  $U_{отв1} = 5,69 [\text{м}^3/\text{с}]$ .

Проводимость трубопровода рассчитывается в соответствии со следующей формулой:

$$U_{мп} = 121 \frac{d^3}{l}, \quad (2.39)$$

$$U_{мп1} = 121 \frac{0,25^3}{1,5} = 1,260 [\text{м}^3/\text{с}].$$

Проводимость трубопровода  $U_{мп1} = 1,260 [\text{м}^3/\text{с}]$ .

В качестве затвора выбираем ЗВЭ-250 с диаметром условного прохода  $d_y = 250 [\text{мм}]$  и проводимостью  $13,4 [\text{м}^3/\text{с}]$ . Тогда проводимость второго участка находится по следующей формуле:

$$\frac{1}{U_{12}} = \frac{1 - \frac{d_y^2}{d_1^2}}{91 d_y^2} + \frac{1}{3,34}, \quad (2.40)$$

$$\frac{1}{U_{12}} = \frac{1 - \frac{0,25^2}{0,25^2}}{91 \cdot 0,25^2} + \frac{1}{13,4},$$

$$\frac{1}{U_{12}} = 0 + \frac{1}{13,4},$$

$$\frac{1}{U_{12}} = \frac{1}{13,4}.$$

Проводимость второго участка  $U_{12} = 13,4 [\text{м}^3/\text{с}]$ .

Третий участок по размерам совпадает с первым участком, т. е.  
 $U_{13} = U_{11} = 1,036 [\text{м}^3/\text{с}], d_3 = 0,25 [\text{м}].$

$$U_{отв} = 116 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (2.41)$$

$$U_{отв3} = 116 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} = 5,69 [\text{м}^3/\text{с}].$$

Проводимость отверстия  $U_{отв3} = 5,69 [\text{м}^3/\text{с}].$

Проводимость трубопровода на третьем участке находится следующим образом:

$$U_{тр} = 121 \frac{d^3}{l}, \quad (2.42)$$

$$U_{тр3} = 121 \frac{0,25^3}{1,5} = 1,260 [\text{м}^3/\text{с}].$$

Проводимость трубопровода  $U_{тр3} = 1,260 [\text{м}^3/\text{с}].$

Общая проводимость участка от криогенного насоса до вакуумной камеры находится по формуле:

$$U_{общ} = \frac{1}{\frac{1}{U_{11}} + \frac{1}{U_{12}} + \frac{1}{U_{13}}}, \quad (2.43)$$

$$U_{общ} = \frac{1}{\frac{1}{1,036} + \frac{1}{13,4} + \frac{1}{1,036}} = 0,498 [\text{м}^3/\text{с}].$$

Общая проводимость выбранного участка вакуумной системы 0,498  $[\text{м}^3/\text{с}]$ , что меньше теоретического значения 1,75  $[\text{м}^3/\text{с}]$  ( $U_{общ} < U_{01}$ ).

Определим коэффициент использования насоса по формуле (2.41):

$$K_{u1} = \frac{U_{\text{общ}}}{U_{\text{общ}} + S_{n1}}, \quad (2.44)$$

$$K_{u1} = \frac{0,498}{0,498 + 1,5} = 0,25.$$

Коэффициент использования  $K_{u1}=0,25$ , что несколько меньше коэффициента использования, найденного теоретически  $K_u = 0,28$ .

Рассчитаем распределение давления по длине участка вакуумной системы от криогенного насоса до откачиваемого объекта. Расчёт будем вести, используя следующие зависимости:

$$p_{Hi} = p_{npi} + Q / S_{mi}, \quad (2.45)$$

где  $p_{npi}$  и  $S_{mi}$  – предельное давление и номинальная быстрота откачки соответствующего насоса.

Повышение давления на последующих элементах  $i$ -го участка вакуумной системы можно определить по потоку  $Q$  и проводимости  $k$ -го элемента  $U_{ki}$ :

$$\Delta p_{ki} = Q / U_{ki}, \quad (2.46)$$

В местах, где имеются сужения трубопроводов, наблюдаются скачки давления:

$$\Delta p_j = Q / U_{0j}, \quad (2.47)$$

где  $U_{0j}$  – проводимость  $j$ -го отверстия.

Давления в сечениях между элементами участка вакуумной системы можно рассчитать по формуле:

$$p_{ki} = p_{npi} + Q/S_{mi} + Q/U_{ki}, \quad (2.48)$$

По формуле (2.45) рассчитывается давление  $P_{H1}$ :

$$P_{H1} = 7 \cdot 10^{-8} + \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{0,375} = 6,89 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

Перепад давлений и давление на входе в элемент определяются по формулам (2.46), (2.47), (2.48):

$$\Delta P_3 = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{1,260} = 2,05 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$P_3 = 6,89 \cdot 10^{-4} + 2,05 \cdot 10^{-4} = 8,94 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$\Delta P_{отв3} = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{5,69} = 0,454 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$P_{отв3} = 8,94 \cdot 10^{-4} + 0,454 \cdot 10^{-4} = 9,394 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$\Delta P_{звэ} = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{13,4} = 0,193 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$P_{звэ} = 9,394 \cdot 10^{-4} + 0,193 \cdot 10^{-4} = 9,587 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$\Delta P_1 = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{1,260} = 2,05 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$P_1 = 9,587 \cdot 10^{-4} + 2,05 \cdot 10^{-4} = 11,637 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$\Delta P_{отв1} = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{5,69} = 0,454 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$P_{отв1} = 11,637 \cdot 10^{-4} + 0,454 \cdot 10^{-4} = 12,091 \cdot 10^{-4} \text{ [Па].}$$

Результаты вычислений сведем в таблицу 2.4

Таблица 2.4 – Распределение давления на участке вакуумной системы от криогенного насоса до откачиваемого объекта

Название элемента	Проводимость элемента $U$ , м <sup>3</sup> /с	Перепад давления на элементах, $\Delta P$ , Па	$P$ на входе в элемент, Па	$P$ на выходе из элемента, Па
Трубопров.3 Отверстие 3	1,260 5,69	$2,05 \cdot 10^{-4}$ $0,454 \cdot 10^{-4}$	$8,94 \cdot 10^{-4}$ $9,394 \cdot 10^{-4}$	$6,89 \cdot 10^{-4}$ $8,94 \cdot 10^{-4}$
ЗВЭ	13,4	$0,193 \cdot 10^{-4}$	$9,587 \cdot 10^{-4}$	$9,394 \cdot 10^{-4}$
Трубопров.1 Отверстие 1	1,260 5,69	$2,05 \cdot 10^{-4}$ $0,454 \cdot 10^{-4}$	$11,637 \cdot 10^{-4}$ $12,091 \cdot 10^{-4}$	$9,587 \cdot 10^{-4}$ $11,637 \cdot 10^{-4}$

### 2.4.2 Высоковакуумная система

Найдем общую проводимость участка вакуумной системы от турбомолекулярного насоса до вакуумной камеры по формуле:

$$U_{02} = S_{н2} \frac{K_{u2}}{1 - K_{u2}}, \quad (2.49)$$

где  $S_{н2}$  - быстрота действия насоса, выбранного по каталогу.

$$U_{02} = 0,5 \frac{0,3}{1 - 0,3} = 0,214 \text{ [м}^3\text{/с]}.$$

Составим компоновочную схему рассматриваемого участка вакуумной системы.

На рисунке 2.6 изображена схема участка высоковакуумной системы.

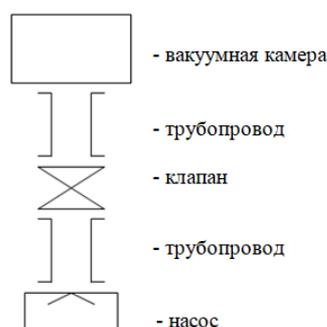


Рисунок 2.6 – Схема участка высоковакуумной системы

Определим проводимости элементов и диаметры трубопроводов. Будем считать в первом приближении, что все элементы имеют одинаковую проводимость.

Тогда общая проводимость участка будет равна:

$$U_{ij} = 3U_{02}, \quad (2.50)$$

$$U_{22} = 3 \cdot 0,214 = 0,643 \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

Режим течения газа в трубопроводе определяется по рабочему давлению  $p_2 = 10^{-7}$  [Па] и диаметру входного патрубка насоса  $d_{ex} = 0,26$  [м].

Критерий Кнудсена определяется по формуле (2.51):

$$Kn = \frac{L}{d_{эф}} = \frac{L_1}{p_2 \cdot d_{ex}}, \quad (2.51)$$

$$Kn = \frac{1,5}{10^{-7} \cdot 0,26} = 0,58 \cdot 10^8 > 1,5 \text{ – режим течения молекулярный.}$$

Диаметр первого элемента может быть рассчитан из условия последовательного соединения входного отверстия и трубопровода:

$$\frac{1}{U_{21}} = \frac{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}}{91d_1^2} + \frac{l_1}{121d_1^3}, \quad (2.52)$$

где  $d_1$  – диаметр рассматриваемого элемента;

$d_0$  – диаметр предыдущего элемента;

$l_1$  – длина рассматриваемого элемента.

$$\frac{1}{1,029} = \frac{1 - \frac{d_1^2}{1,8^2}}{91d_1^2} + \frac{1,5}{121d_1^3};$$

$$117,59d_1^3 = \left(1 - \frac{d_1^2}{3,24}\right)1,33d_1 + 1,5;$$

$$117,59d_1^3 = 1,33d_1 - 0,41d_1^3 + 1,5;$$

$$118d_1^3 - 1,33d_1 - 1,5 = 0;$$

$$d_1^3 - 0,011d_1 - 0,013 = 0.$$

Определим корни уравнения:

$$d_0 \approx 0,25071;$$

$$d_1 \approx -0,12535 - 0,19011i;$$

$$d_2 \approx -0,12535 + 0,19011i.$$

Два последних корня уравнения являются комплексными числами, т.е. в нашем случае являются посторонними.

По ГОСТ 18626 – 73 выбираем диаметр  $d_l = 250$  [мм]. Тогда проводимость первого участка рассчитывается по формуле (2.49) следующим образом:

$$\frac{1}{U_{21}} = \frac{1 - \frac{0,25^2}{1,8^2}}{91 \cdot 0,25^2} + \frac{1,5}{121 \cdot 0,25^3},$$

$$\frac{1}{U_{21}} = 0,965 \text{ [с/м}^3\text{]}.$$

Проводимость первого участка  $U_{21} = 1,036$  [м<sup>3</sup>/с].

Так как при последовательном соединении элементов с различными диаметрами в местах сужения проходного сечения возникают дополнительные сопротивления потоку газа,  $d_0 > d_1$ , следовательно, находим проводимость отверстия для молекулярного режима течения газа:

$$U_{ом6} = 116 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (2.53)$$

$$U_{ом61} = 116 \cdot \frac{3.14 \cdot 0,25^2}{4} = 5,69 [\text{м}^3/\text{с}].$$

Проводимость отверстия  $U_{ом61} = 5,69 [\text{м}^3/\text{с}]$ .

Проводимость трубопровода рассчитывается в соответствии со следующей формулой:

$$U_{мп} = 121 \frac{d^3}{l}, \quad (2.54)$$

$$U_{мп1} = 121 \frac{0,25^3}{1,5} = 1,260 [\text{м}^3/\text{с}].$$

Проводимость трубопровода  $U_{мп1} = 1,260 [\text{м}^3/\text{с}]$ .

В качестве затвора выбираем ЗВЭ-250 с диаметром условного прохода  $d_y = 250 [\text{мм}]$  и проводимостью  $13,4 [\text{м}^3/\text{с}]$ . Тогда проводимость второго участка находится по следующей формуле:

$$\frac{1}{U_{22}} = \frac{1 - \frac{d_y^2}{d_1^2}}{91d_y^2} + \frac{1}{3,34}, \quad (2.55)$$

$$\frac{1}{U_{22}} = \frac{1 - \frac{0,25^2}{0,25^2}}{91 \cdot 0,25^2} + \frac{1}{13,4},$$

$$\frac{1}{U_{22}} = 0 + \frac{1}{13,4},$$

$$\frac{1}{U_{22}} = \frac{1}{13,4}.$$

Проводимость второго участка  $U_{22} = 13,4 [\text{м}^3/\text{с}]$ .

Третий участок по размерам совпадает с первым участком, т. е.  
 $U_{23} = U_{21} = 1,036 [\text{м}^3/\text{с}], d_3 = 0,25 [\text{м}].$

$$U_{отв} = 116 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (2.56)$$

$$U_{отв3} = 116 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} = 5,69 [\text{м}^3/\text{с}].$$

Проводимость отверстия  $U_{отв3} = 5,69 [\text{м}^3/\text{с}].$

Проводимость трубопровода на третьем участке находится следующим образом:

$$U_{тр} = 121 \frac{d^3}{l}, \quad (2.57)$$

$$U_{тр3} = 121 \frac{0,25^3}{1,5} = 1,260 [\text{м}^3/\text{с}].$$

Проводимость трубопровода  $U_{тр3} = 1,260 [\text{м}^3/\text{с}].$

Общая проводимость участка от турбомолекулярного насоса до вакуумной камеры находится по формуле:

$$U_{общ} = \frac{1}{\frac{1}{U_{21}} + \frac{1}{U_{22}} + \frac{1}{U_{23}}}, \quad (2.58)$$

$$U_{общ} = \frac{1}{\frac{1}{1,036} + \frac{1}{13,4} + \frac{1}{1,036}} = 0,498 [\text{м}^3/\text{с}].$$

Общая проводимость выбранного участка вакуумной системы  $0,498 [\text{м}^3/\text{с}]$ , что больше теоретического значения  $0,214 [\text{м}^3/\text{с}]$  ( $U_{общ} > U_{02}$ ).

Определим коэффициент использования насоса по формуле (2.59):

$$K_{u2} = \frac{U_{\text{общ}}}{U_{\text{общ}} + S_{n2}}, \quad (2.59)$$

$$K_{u2} = \frac{0,498}{0,498 + 0,5} = 0,498.$$

Коэффициент использования  $K_{u2}=0,498$ , что больше коэффициента использования, найденного теоретически  $K_u = 0,3$ .

Рассчитаем распределение давления по длине участка вакуумной системы от турбомолекулярного насоса до откачиваемого объекта. Расчёт будем вести, используя следующие зависимости:

$$p_{Hi} = p_{npi} + Q / S_{mi}, \quad (2.60)$$

где  $p_{npi}$  и  $S_{mi}$  – предельное давление и номинальная быстрота откачки соответствующего насоса.

Повышение давления на последующих элементах  $i$ -го участка вакуумной системы можно определить по потоку  $Q$  и проводимости  $k$ -го элемента  $U_{ki}$ :

$$\Delta p_{ki} = Q / U_{ki}, \quad (2.61)$$

В местах, где имеются сужения трубопроводов, наблюдаются скачки давления:

$$\Delta p_j = Q / U_{0j}, \quad (2.62)$$

где  $U_{0j}$  – проводимость  $j$ -го отверстия.

Давления в сечениях между элементами участка вакуумной системы можно рассчитать по формуле:

$$p_{ki} = p_{npi} + Q/S_{mi} + Q/U_{ki}, \quad (2.63)$$

По формуле (2.60) рассчитывается давление  $P_{H2}$ :

$$P_{H2} = 10^{-7} + \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{0,384} = 6,73 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

Перепад давлений и давление на входе в элемент определяются по формулам (2.61), (2.62), (2.63):

$$\Delta P_3 = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{1,260} = 2,05 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$P_3 = 6,73 \cdot 10^{-4} + 2,05 \cdot 10^{-4} = 8,78 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$\Delta P_{отв3} = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{5,69} = 0,454 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$P_{отв3} = 8,78 \cdot 10^{-4} + 0,454 \cdot 10^{-4} = 9,234 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$\Delta P_{звэ} = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{13,4} = 0,193 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$P_{звэ} = 9,234 \cdot 10^{-4} + 0,193 \cdot 10^{-4} = 9,427 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$\Delta P_1 = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{1,260} = 2,05 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$P_1 = 9,427 \cdot 10^{-4} + 2,05 \cdot 10^{-4} = 11,477 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$\Delta P_{отв1} = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{5,69} = 0,454 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$P_{отв1} = 11,477 \cdot 10^{-4} + 0,454 \cdot 10^{-4} = 11,931 \cdot 10^{-4} \text{ [Па].}$$

Результаты вычислений сведем в таблицу 2.5

Таблица 2.5 – Распределение давления на участке вакуумной системы от турбомолекулярного насоса до откачиваемого объекта

Название элемента	Проводимость элемента $U$ , м <sup>3</sup> /с	Перепад давления на элементах, $\Delta P$ , Па	$P$ на входе в элемент, Па	$P$ на выходе из элемента, Па
Трубопров.3	1,260	$2,05 \cdot 10^{-4}$	$8,780 \cdot 10^{-4}$	$6,73 \cdot 10^{-4}$
Отверстие 3	5,69	$0,454 \cdot 10^{-4}$	$9,234 \cdot 10^{-4}$	$8,780 \cdot 10^{-4}$
ЗВЭ	13,4	$0,193 \cdot 10^{-4}$	$9,427 \cdot 10^{-4}$	$9,234 \cdot 10^{-4}$
Трубопров.1	1,260	$2,05 \cdot 10^{-4}$	$11,477 \cdot 10^{-4}$	$9,427 \cdot 10^{-4}$
Отверстие 1	5,69	$0,454 \cdot 10^{-4}$	$11,931 \cdot 10^{-4}$	$11,477 \cdot 10^{-4}$

### 2.4.3 Область среднего и низкого вакуума

Найдем общую проводимость участка вакуумной системы от золотникового насоса до турбомолекулярного насоса по формуле:

$$U_{03} = S_{н3} \frac{K_{u3}}{1 - K_{u3}}, \quad (2.64)$$

где  $S_{н3}$  - быстрота действия насоса, выбранного по каталогу.

$$U_{03} = 0,02 \frac{0,78}{1 - 0,78} = 0,071 \text{ [м}^3\text{/с]}.$$

Составим компоновочную схему рассматриваемого участка вакуумной системы.

На рисунке 2.7 изображена схема участка вакуумной системы.

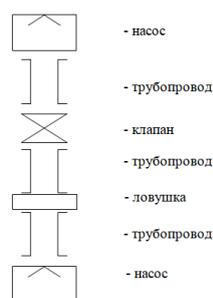


Рисунок 2.7 – Схема участка вакуумной системы

Определим проводимости элементов и диаметры трубопроводов. Будем считать в первом приближении, что все элементы имеют одинаковую проводимость.

Тогда общая проводимость участка будет равна:

$$U_{ij} = 5U_{03}, \quad (2.65)$$

$$U_{33} = 5 \cdot 0,071 = 0,355 \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

Режим течения газа в трубопроводе определяется по рабочему давлению  $p_3 = 10^{-7}$  [Па] и диаметру входного патрубка насоса  $d_{ex} = 0,4$  [м].

Критерий Кнудсена определяется по формуле (2.62):

$$Kn = \frac{L}{d_{эф}} = \frac{L_1}{p_3 \cdot d_{ex}}, \quad (2.66)$$

$$Kn = \frac{1,5}{10^{-7} \cdot 0,4} = 0,38 \cdot 10^8 > 1,5 \text{ – режим течения молекулярный.}$$

Диаметр первого элемента может быть рассчитан из условия последовательного соединения входного отверстия и трубопровода:

$$\frac{1}{U_{31}} = \frac{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}}{91d_1^2} + \frac{l_1}{121d_1^3}, \quad (2.67)$$

где  $d_1$  – диаметр рассматриваемого элемента;

$d_0$  – диаметр предыдущего элемента;

$l_1$  – длина рассматриваемого элемента.

$$\frac{1}{0,018} = \frac{1 - \frac{d_1^2}{0,5^2}}{91d_1^2} + \frac{1,5}{121d_1^3}; \quad (2.68)$$

$$6722,22d_1^3 = \left(1 - \frac{d_1^2}{0,25}\right)1,33d_1 + 1,5;$$

$$6722,22d_1^3 = 1,33d_1 - 5,32d_1^3 + 1,5;$$

$$6727,54d_1^3 - 1,33d_1 - 1,5 = 0;$$

$$d_1^3 - 0,000198d_1 - 0,000223 = 0.$$

Определим корни уравнения:

$$d_0 \approx 0,06173;$$

$$d_1 \approx -0,030865 - 0,051574i;$$

$$d_2 \approx -0,030865 + 0,051574i.$$

Два последних корня уравнения являются комплексными числами, т.е. в нашем случае являются посторонними.

По ГОСТ 18626 – 73 выбираем диаметр  $d_1 = 65$  [мм]. Тогда проводимость первого участка рассчитывается по формуле (2.68) следующим образом:

$$\frac{1}{U_{31}} = \frac{1 - \frac{0,065^2}{0,05^2}}{91 \cdot 0,065^2} + \frac{1,5}{121 \cdot 0,065^3},$$

$$\frac{1}{U_{31}} = 43,345 \text{ [с/м}^3\text{]}.$$

Проводимость первого участка  $U_{31} = 0,023$  [м<sup>3</sup>/с].

Так как при последовательном соединении элементов с различными диаметрами в местах сужения проходного сечения возникают дополнительные сопротивления потоку газа,  $d_0 > d_1$ , следовательно, находим проводимость отверстия для молекулярного режима течения газа:

$$U_{отв} = 116 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (2.69)$$

$$U_{отв1} = 116 \cdot \frac{3.14 \cdot 0,065^2}{4} = 0,385 \text{ [м}^3\text{/с]}.$$

Проводимость отверстия  $U_{отв1} = 0,385 \text{ [м}^3\text{/с]}$ .

Проводимость трубопровода рассчитывается в соответствии со следующей формулой:

$$U_{тр} = 121 \frac{d^3}{l}, \quad (2.70)$$

$$U_{тр1} = 121 \frac{0,065^3}{1,5} = 0,022 \text{ [м}^3\text{/с]}.$$

Проводимость трубопровода  $U_{тр1} = 0,022 \text{ [м}^3\text{/с]}$ .

В качестве клапана выбираем 23ВЭ-100 с диаметром условного прохода  $d_y = 100 \text{ [мм]}$  и проводимостью в молекулярном режиме течения газа  $1,2 \text{ [м}^3\text{/с]}$ .

Проводимость второго участка будет равна:

$$\frac{1}{U_{32}} = \frac{1 - \frac{d_y^2}{d_1^2}}{91 d_y^2} + \frac{1}{1,2}, \quad (2.71)$$

$$\frac{1}{U_{32}} = \frac{1 - \frac{0,1^2}{0,065^2}}{91 \cdot 0,1^2} + \frac{1}{1,2},$$

$$\frac{1}{U_{32}} = 0,428.$$

Таким образом,  $U_{32} = 2,335 \text{ [м}^3\text{/с]}$ .

Диаметр трубопровода на третьем участке:

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{l \cdot U_{23}}{121}}, \quad (2.72)$$

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot 0,018}{121}} = 0,061 [\text{м}],$$

По ГОСТ 18626-73 выбираем условный проход трубопровода  $d_3 = 65$  [мм]. Тогда проводимость третьего участка рассчитывается следующим образом:

$$\frac{1}{U_{33}} = \frac{1 - \frac{d_3^2}{d_y^2}}{91d_3^2} + \frac{l_3}{121d_3^3}, \quad (2.73)$$

$$\frac{1}{U_{33}} = \frac{1 - \frac{0,065^2}{0,1^2}}{91 \cdot 0,065^2} + \frac{1,5}{121 \cdot 0,065^3},$$

$$\frac{1}{U_{33}} = 46,64.$$

Проводимость на третьем участке  $U_{33} = 0,021$  [м<sup>3</sup>/с].

Проводимость трубопровода рассчитывается в соответствии со следующей формулой:

$$U_{mp} = 121 \frac{d^3}{l}, \quad (2.74)$$

$$U_{mp3} = 121 \frac{0,065^3}{2} = 0,017 [\text{м}^3/\text{с}].$$

Проводимость трубопровода  $U_{mp3} = 0,017$  [м<sup>3</sup>/с].

Выбирается ловушка ЛАФ-63,  $d_y = 0,063$  [м] с проводимостью  $U_{34} = 0,04$  [м<sup>2</sup>/с].

Пятый участок по размерам совпадает с третьим участком, т. е.  
 $U_{35} = U_{33} = 0,021 \text{ [м}^3/\text{с]}, d_5=0,065 \text{ [м]}.$

Общая проводимость находится из следующего выражения:

$$U_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{U_{31}} + \frac{1}{U_{32}} + \frac{1}{U_{33}} + \frac{1}{U_{34}} + \frac{1}{U_{35}}}, \quad (2.75)$$

$$U_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{0,023} + \frac{1}{2,335} + \frac{1}{0,021} + \frac{1}{0,04} + \frac{1}{0,021}} = 0,06 \text{ [м}^2/\text{с]};$$

Общая проводимость выбранного участка вакуумной системы  
 $U_{\text{общ}} = 0,06 \text{ [м}^3/\text{с]},$  что несколько меньше требуемой  $U_{03} = 0,071 \text{ [м}^3/\text{с]}.$

Определим коэффициент использования насоса по формуле:

$$K_{u3} = \frac{U_{\text{общ}}}{U_{\text{общ}} + S_{H3}}, \quad (2.76)$$

$$K_{u3} = \frac{0,06}{0,06 + 0,02} = 0,75.$$

Коэффициент использования  $K_{u3} = 0,75,$  что несколько меньше коэффициента использования, найденного теоретически  $K_u = 0,8.$

По формуле (2.60) рассчитывается давление  $P_{H3}:$

$$P_{H3} = 1 + \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{0,75} = 1 \text{ [Па]}.$$

Перепад давлений и давление на входе в элемент определяются по формулам (2.61), (2.62), (2.63):

$$\Delta P_5 = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{0,021} = 0,0123 \text{ [Па]};$$

$$P_5 = 1 + 0,0123 = 1,0123 \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_{лов} = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{0,04} = 0,0065 \text{ [Па];}$$

$$P_{лов} = 1,0123 + 0,0065 = 1,0188 \text{ [Па];}$$

$$\Delta P_3 = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{0,021} = 0,0123 \text{ [Па];}$$

$$P_3 = 1,0188 + 0,0123 = 1,0311 \text{ [Па];}$$

$$\Delta P_{ЗВЭ} = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{1,2} = 0,0002 \text{ [Па];}$$

$$P_{ЗВЭ} = 1,0311 + 0,0002 = 1,0313 \text{ [Па];}$$

$$\Delta P_1 = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{0,023} = 0,0112 \text{ [Па];}$$

$$P_1 = 1,0313 + 0,0112 = 1,0425 \text{ [Па];}$$

$$\Delta P_{отвл} = \frac{2,583 \cdot 10^{-4}}{0,385} = 0,0007 \text{ [Па];}$$

$$P_{отвл} = 1,0425 + 0,0007 = 1,0432 \text{ [Па].}$$

Результаты вычислений сведем в таблицу 2.6

Таблица 2.6 – Распределение давления на участке вакуумной системы от золотникового насоса до откачиваемого объекта

Название элемента	Проводимость элемента $U$ , м <sup>3</sup> /с	Перепад давления на элементах, $\Delta P$ , Па	$P$ на входе в элемент, Па	$P$ на выходе из элемента, Па
Трубопров.5	0,021	0,0123	1,0123	1
Ловушка 4	0,04	0,0065	1,0188	1,0123
Трубопров.3	0,021	0,0123	1,0311	1,0188
ЗВЭ 2	1,2	0,0002	1,0313	1,0311
Трубопров.1	0,023	0,0112	1,0425	1,0313
Отверстие 1	0,385	0,0007	1,0432	1,0425

Для определения времени откачки от атмосферного давления до 1 [Па] золотниковым насосом, воспользуемся формулой (2.77):

$$S_{н3} = 2,3 \frac{V}{\Delta t_1 K_{u3}} \lg \frac{p_0}{p_1}. \quad (2.77)$$

$$\Delta t_1 = 2,3 \frac{V}{S_{н3} K_{u3}} \lg \frac{p_0}{p_1}, \quad (2.78)$$

$$\Delta t_1 = 2,3 \cdot \frac{11,445}{0,02 \cdot 0,75} \cdot \lg \frac{10^5}{1} = 8774,5 \text{ [с]}.$$

Для определения времени откачки от давления 1 [Па] до рабочего давления турбомолекулярным насосом, воспользуемся формулой (2.66):

$$S_{н2} = 2,3 \frac{V}{\Delta t_2 K_{u2}} \lg \frac{p_1}{p_2}. \quad (2.79)$$

$$\Delta t_2 = 2,3 \frac{V}{S_{н2} K_{u2}} \lg \frac{p_1}{p_2}, \quad (2.80)$$

$$\Delta t_2 = 2,3 \cdot \frac{11,445}{0,5 \cdot 0,498} \cdot \lg \frac{1}{10^{-7}} = 740,02 \text{ [с]}.$$

Тогда общее время откачки составит 9514,52 [с], или 2,64 [ч], что много меньше заданного времени откачки 12 [ч].

### 3 ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

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

Вакуумная установка состоит из следующих составных частей:

1. камера вакуумная;
2. система вакуумирования;
3. система хранения сжатого гелия;
4. система разгерметизации;
5. система управления, измерения и контроля;
6. система обеспечения гарантированного электропитания.

Рабочее давление в камере достигается с помощью системы вакуумирования, состоящей из форвакуумной, высоковакуумной сверхвысоковакуумной систем. Предварительная откачка камеры до давления 1 [Па] производится форвакуумной системой откачки с использованием золотникового насоса АВЗ-20Д. Предельное давление в камере  $10^{-7}$  [Па] достигается турбомолекулярным вакуумным насосом ТМН-500, обеспечивающий безмасляную откачку камеры. Поддержание необходимой степени вакуума в течении испытаний обеспечивается криогенным насосом Cryo-Plex 10.

Все элементы вакуумной установки смонтированы в транспортных контейнерах, выпускаемых промышленностью, что делает ее мобильной в пределах космодрома и не требует специальных помещений для размещения оборудования.

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

### 3.1 Вакуумная камера

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

Корпус камеры состоит из эллиптического днища, горизонтально расположенной цилиндрической части диаметром 1800 [мм], эллиптической крышки диаметром 1800 [мм], уплотнения крышки, седловых опор. Материал эллиптической крышки, днища, цилиндрической части – сталь 12X18Н12Т толщиной 14 [мм].

На внешней поверхности цилиндрической части, между эллиптическим днищем и приварным фланцем, расположены десять колец жесткости высотой 80 [мм]. Кольца жесткости придают жесткость и устойчивость цилиндрической оболочке при воздействии атмосферного давления. Для визуализации процесса испытаний в цилиндрическую обечайку вварен штуцер диаметром 800 [мм]. Смонтировано смотровое окно из кварцевого стекла. К одному из торцов обечайки приварено кольцо с проточкой типа «шип-паз», в которую вставляется резиновый уплотнитель сечением 10×30 [мм] для крепления эллиптической крышки.

Эллиптическое днище изготовлено штамповкой из листового проката стали марки 12X18Н12Т с отбортовкой 25 [мм], согласно ГОСТ 6533-78, привариваемой к цилиндрической обечайке. К днищу приварены два непроходных штуцера диаметром 250 [мм] для коммутации вакуумной камеры с системой вакуумирования.

Эллиптическая часть крышки изготовлена штамповкой из листового проката стали марки 12X18Н12Т с отбортовкой 25 [мм], согласно ГОСТ 6533-78, привариваемой к фланцу. Крышка крепится на обечайку тридцати двумя болтами с диаметром 36 [мм]. Для простоты в эксплуатации вместо болтового крепления используется зажимное устройство в количестве шести штук. Усилие прижатия крышки обеспечивается как в болтовом соединении.

Вакуумная камера располагается на двух седловых опорах, разделенная металлическими листами толщиной 14 [мм]. Седловые опоры имеют ширину

300 [мм] и высоту 200 [мм]. Вакуумная камера помещена в 40-ка футовый контейнер для защиты от воздействия окружающей среды при транспортировке.

Для проведения термовакуумных испытаний (нагрева) в конструкции камеры имеются галогенные лампы с низким газовыделением.

Для простоты и удобства погрузки (выгрузки) ОИ в вакуумную камеру, в ее конструкции предусмотрена выдвижная платформа с крепежными элементами для фиксации ОИ в заданном положении. Перед погрузкой ОИ в камеру производится отстыковка крышки и ее перемещение в заднюю часть транспортного контейнера. После этого происходит выкатывание погрузочной платформы и открытие верхних створок контейнера для погрузки ОИ. Установщик с КА въезжает в помещение ангара и останавливается на специально отмеченных местах. Затем производится открытие боковой створки транспортного контейнера до горизонтального положения, на которой организуется рабочее место для обслуживающего персонала. Установщик КА начинает процесс опускания изделия вертикально вниз в сторону платформы. По завершению стыковки КА с платформой происходит загрузка платформы с КА в вакуумную камеру с последующей стыковкой крышки. Крышка фиксируется с помощью зажимных устройств. Вакуумная емкость с ОИ готова к вакуумным испытаниям.

### **3.2 Система откачки**

Система откачки состоит из золотникового, молекулярного и криогенного насосов.

#### **3.2.1 Золотниковый (плунжерный) насос**

По конструкции золотниковый насос представляет собой комбинацию поршневого и пластинчато-статорного насосов. Основной деталью насоса является плунжер, состоящий из полый пластины, закрепленной на обойме и ротора, эксцентрически насаженного на ведущем валу. Пластина выполняющая роль поршня, в верхней части связана с цилиндрическим шарнирным соединением — золотником, который обеспечивает свободное качание и воз-

вратно-поступательное движение плунжера. При вращении ротора обойма скользит по нему, а линия соприкосновения обоймы со статором перемещается (катится) по его внутренней поверхности, что уменьшает трение и нагрев насоса.

Золотниковые насосы обладают значительно большей быстротой действия по сравнению с другими типами вращательных пластинчатых насосов, достигаемой как за счет увеличения числа оборотов, так и за счет предварительного всасывания газа поршнем, которое при прочих равных условиях улучшает заполнение рабочей камеры насоса.

На рисунке 3.1 изображена схема золотникового насоса.

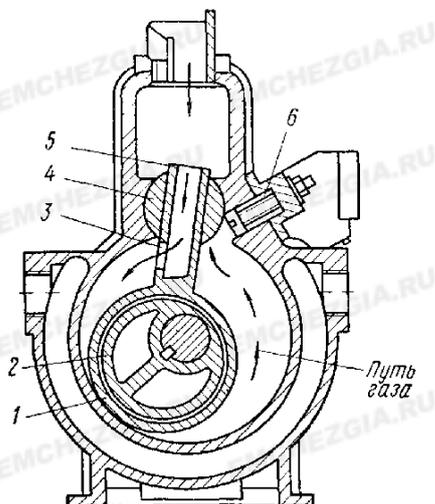


Рисунок 3.1 – Схема золотникового насоса

- 1 — цилиндрическая обойма, 2 — ротор, 3 — отверстие, 4 — золотник,  
5 — полый параллелепипед, 6 — выпускной клапан

Насос АВЗ-20Д имеет следующие характеристики:

- диапазон рабочих давлений:  $5 \cdot 10^{-2} - 10^5$  [Па];
- номинальная быстрота действия:  $S_H = 0,02$  [ $\text{м}^3/\text{с}$ ];
- диаметр входного патрубка:  $d_{вх} = 40$  [мм];
- предельное давление:  $P_{пр} = 0,01$  [Па];
- наибольшее давление запуска:  $P_{наиб.} = 10^5$  [Па];

- частота вращения: 1500 [об/мин];
- расход охлаждающей воды: - [л/с];
- количество заливаемого масла: 3,5 [дм<sup>3</sup>];
- мощность электродвигателя: 2,2 [кВт];
- габариты: 650×400×665 [мм];
- масса: 185 [кг].

### 3.2.2 Турбомолекулярный насос

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

Рабочий механизм турбомолекулярного насоса состоит из пакетов роторных и статорных дисков, в которых в радиальном направлении выполнены косые прорезы (каналы) таким образом, что стенки их образуют определенный угол с осью вращения ротора. Прорезы статорных дисков расположены симметрично по отношению к прорезам роторных дисков. Молекулы газа, поступающие из всасывающего патрубка, приобретают в косых прорезях составляющую скорости в аксиальном направлении в сторону предварительного вакуума. Каждая пара дисков ротора и статора представляет собой одну ступень откачки, которая не создает большой степени сжатия. Но в этих условиях мал и поток газа, проникающего обратно сквозь прорезы, так что расстояния между дисками и размеры прорезей могут быть сравнительно большими (обычно ~1 мм). При таких зазорах ротору можно сообщать очень большие скорости вращения, не опасаясь заклинивания, что является несомненным преимуществом турбомолекулярных насосов по сравнению с прежними конструкциями. Основные характеристики турбомолекулярного насоса ТМН-500:

- номинальная быстрота действия:  $S_H = 0,5$  [м<sup>3</sup>/с];
- диаметр входного патрубка:  $d_{вх} = 55$  [мм];
- предельное давление:  $P_{np} = 10^{-7}$  [Па];
- наибольшее давление запуска:  $P_{наиб.} = 10^{-2}$  [Па];

- расход охлаждающей воды: 0,03 [л/с];
- мощность электродвигателя: 0,8 [кВт];
- габариты: 675×310×385 [мм];
- масса: 210 [кг].

На рисунке 3.2 изображена схема турбомолекулярного насоса.

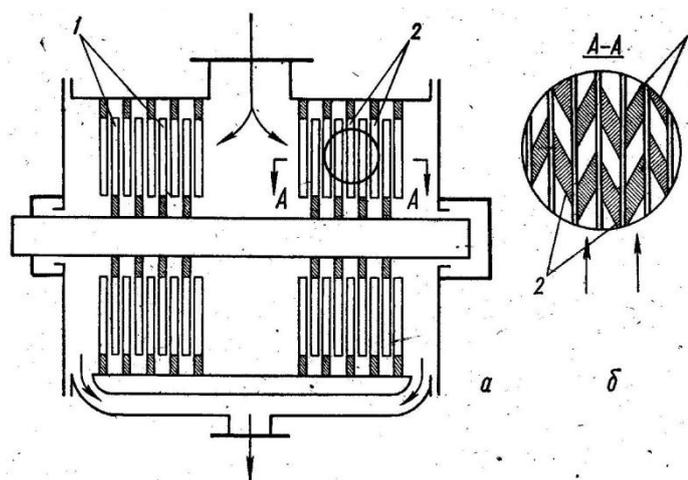


Рисунок 3.2 – Схема турбомолекулярного насоса

### 3.2.3 Криогенный насос

В криогенном вакуумном насосе используются крайне низкие температуры. Действие насоса основано на том, что интенсивность хаотического движения молекул уменьшается при понижении температуры. Такой насос представляет собой камеру с металлическим сосудом, закрепленным в нижней ее части. Через сосуд циркулирует жидкий гелий, температура которого равна 4,2 К ( $-268,96^{\circ}$  С). Металлические радиационные экраны закрывают сосуд от теплового излучения, но пропускают молекулы газа. Молекула газа, попадающая на поверхность сосуда с гелием, теряет свою кинетическую энергию и остается на этой поверхности.

Криогенный насос может работать в любом положении и устанавливается без соединительных трубопроводов, снижающих быстроту откачки. Такой насос незаменим при откачке больших камер, в которых имитируются космические условия.

Криогенные насосы могут создавать давления ниже  $10^{-11}$  мм рт. ст. Давление порядка  $10^{-13}$  мм рт. ст. можно получить, просто частично погрузив небольшую стеклянную вакуумную систему в жидкий гелий.

Основные характеристики криогенного насоса Cryo Plex 10:

- номинальная быстрота действия:  $S_H = 3$  [м<sup>3</sup>/с];
- диаметр входного патрубка:  $d_{вх} = 320$  [мм];
- предельное давление:  $P_{пр} = 7 \cdot 10^{-8}$  [Па];
- высота насоса: 607 [мм];
- масса: 39 [кг].

На рисунке 3.3 изображена схема криогенного гелиевого насоса с экраном на жидком азоте.

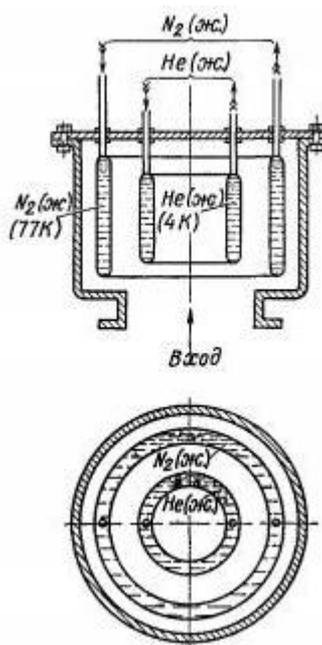


Рисунок 3.3 – Схема криогенного гелиевого насоса с экраном на жидком азоте

### 3.2.4 Форвакуумная азотная ловушка (ЛАФ)

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 (ЛАФ), охлаждаемая жидким азотом, представляет собой трубу 11 с остроенным 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 экране 12. Ловушка ЛАФ эффективно поглощает также пары воды.

Установка ловушки перед форвакуумным масляным насосом позволяет получить предельное остаточное давление  $2 \cdot 10^{-3}$  Па. Ловушки могут работать не менее 15 ч без доливки жидкого азота в диапазоне давления  $10^5 - 10^2$  Па. Основные характеристики форвакуумной азотной ловушки:

- условный диаметр входного патрубка:  $d_v = 63$  [мм];
- проводимость:  $0,4$  [ $\text{м}^3/\text{с}$ ];
- расход жидкого азота:  $0,28$  [ $\text{м}^3/\text{с}$ ];
- мощность электродвигателя:  $0,8$  [кВт];
- количество жидкого азота:  $6$  [л];
- габариты:  $\text{Ø } 300 \times 500$  [мм];
- масса:  $14,5$  [кг].

На рисунке 3.4 изображена схема форвакуумной азотной ловушки.

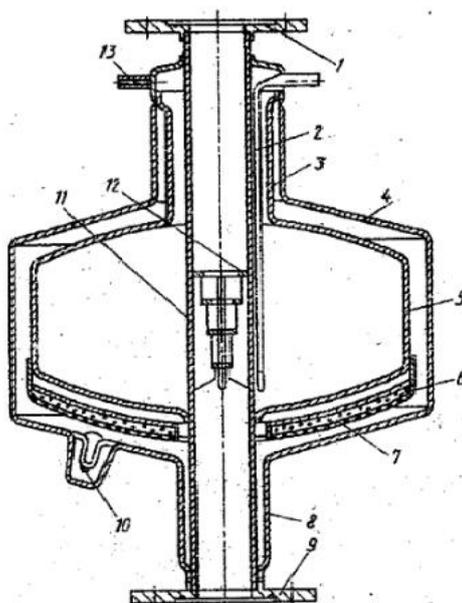


Рисунок 3.4 – Схема форвакуумной азотной ловушки

Низкотемпературная фервакуульная ловушка ЛАФ: 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.

### 3.2.5 Вакуумные трубопроводы

Вакуумные трубопроводы, работающие при температуре не выше 600°С, в зависимости от степени разреженности подразделяют на категории (ГОСТ 5197-85): 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 вакуумных трубопроводов применяют специальную арматуру с сильфонным уплотнением, которая должна соответствовать требуемой категории вакуума и обеспечивать вакуумное уплотнение в любом положении запорного органа.

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 изготовляют из вакуумной резины, а также комбинированные.

### **3.2.6 Запорно-регулирующая аппаратура**

Запорно-регулирующая аппаратура 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-250 с проводимостью 13,4 [м<sup>3</sup>/с], ЗВЭ-160 с проводимостью 3,34 [м<sup>3</sup>/с].

### **3.2.7 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 вакуумной камере, воспринимающее непосредственно измеряемое давление и преобразующее его в другую физическую величину. Измерительный блок вакуумметра – устройство, обеспечивающее требуемый электрический режим работы ПД, 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].

### **3.3 Система разгерметизации**

Система разгерметизации предназначена для напуска в камеру сухого сжатого воздуха. Параметры трубопроводов арматуры выбраны с учётом снижения шума в процессе разгерметизации. Для подсоединения системы разгерметизации используется передвижная рессиверная смонтированная в транспортировочном 20-ти футовом контейнере. В пневмощите установлены ручные вентили для возможности подключения вывода. В пневмощите системы установлен редуктор, понижающие давление до  $2 \text{ кгс/см}^2$ , предохранительные клапаны перед и за редуктором. Контроль давления на входе и выходе из редуктора осуществляется манометрами.

### **3.4 Система управления, измерения и контроля**

Система предназначена для управления, измерения и контроля параметром вакуумной установки и находится в непосредственной близости от системы в мобильном контейнере. Часть контейнера используется под золотниковый насос, а другая часть под операторскую комнату, откуда можно измерять, контролировать и управлять за процессом испытания (вакуумирования).

Система состоит из пульта управления, защиты, сигнализации и контроля; щита пусковой аппаратуры вакуумных насосов; щита пусковой аппаратуры вакуумных затворов. Для контроля за работой СВУ производится измерение технологических параметров.

Управление системой производится по показаниям контрольно-измерительных приборов и сигнальных устройств, согласованных через контроллеры ввода – вывода с ПК. Кроме указанной аппаратуры, на СУИК предусмотрена система блокировок, смонтированная на пульте управления.

Система управления, измерения и контроля располагается в отсеке технологического контейнера, а в агрегатном отсеке находится насос НВЗ-500. С командного пункта оператор, наблюдая за процессом вакуумирования и испытания, может вносить корректировки при необходимости с пульта управления.

### **3.5 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 течеискателя ТИ1-50

- проверка любых промышленных объектов (вакуумные камеры, баки, трубопроводы, запорная арматура и т.п.), в том числе с высоким и нестабильным уровнем фона
- высокопроизводительная поточная проверка герметизированных изделий (уплотнения, запорная арматура, корпуса электронных приборов, изделия микроэлектроники)
- встраивание в автоматические линии с централизованным управлением
- решение научно-исследовательских задач, требующих нестандартных алгоритмов при работе с вакуумом

Технические характеристики течеискателя ТИ1-30:

- 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].

На рисунке 3.5 изображен гелиевый течеискатель ТИ1-50.



Рисунок 3.5 – Гелиевый течеискатель ТИ1-50

### 3.6 Транспортировочные контейнеры

Универсальные контейнеры, перевозимые на подвижном составе всех основных видов магистрального, промышленного и внутрипортового транспорта, подразделяются в зависимости от массы брутто и конструкции подъемных устройств на три типа:

- крупнотоннажные массой брутто от 10 т и выше с угловыми фитингами;
- среднетоннажные массой брутто от 3 до 10 т с рымами;
- малотоннажные массой брутто менее 3 т с рымами и на колесах (рис. 1).
- открытые контейнеры

Крупнотоннажные контейнеры массой брутто 10; 16; 24; 25,4 и 30,48 т предназначаются для бесперегрузочной доставки грузов преимущественно малотоннажными отправлениями (рис. 2), а среднетоннажные – мелкими отправлениями. Контейнеры первого типа (24 т и более) широко используются на железнодорожном, морском, речном и автомобильном транспорте. Малотоннажные контейнеры предназначены в основном для автомобильного транспорта при перевозке мелких отправок грузов.

Сфера применения контейнеров зависит от имеющихся на них приспособлений для перегрузки.

Универсальные контейнеры широкого обращения оборудуются рымами, пазами и фитингами, обеспечивающими их перегрузку кранами с ручными и автоматическими захватами и вилочными погрузчиками.

Универсальные контейнеры ограниченного обращения могут быть оборудованы всеми устройствами для перегрузки указанными машинами либо одними из них (например, рымами). Универсальные контейнеры широкого обращения всех типоразмеров перевозятся на открытом подвижном составе железнодорожного и автомобильного транспорта.

Малотоннажные контейнеры с колесами малого диаметра, имеющие ограниченное применение, перевозятся в крытых вагонах и на открытых автомобилях. В СССР такие контейнеры применялись для перевозок мелких отправок грузов массой до 1-1,1 т. В настоящее время для этой же цели создаются новые малотоннажные контейнеры с устройствами для перегрузки на собственном ходу и с помощью вилочных погрузчиков и других грузоподъемных машин.

Универсальные крупнотоннажные унифицированные контейнеры типоразмеров 1АА, 1А, 1АХ, 1СС, 1С и 1СХ, 1Д и 1ДХ приняты в качестве основных для КТС (контейнерной транспортной системы), действующей в СНГ и в других странах мира. Среди них контейнеры 1СС рассчитаны на более широкое применение во внутреннем и международном сообщениях. Крупнотоннажные контейнеры массой брутто 10 т (1Д) и 25 т (1ВВ, 1В) в СНГ, как

правило, не применяются. В то же время строящиеся платформы, в том числе и специализированные для железных дорог СССР, приспособлены для перевозки иностранных транзитных и поступающих под выгрузку с импортными грузами контейнеров этих типоразмеров.

Универсальные малотоннажные контейнеры массой брутто 1,25 т (АУК-1,25) и 0,625т (АУК-0,625) являются контейнерами ограниченного обращения, так как могут перевозиться только автомобильным транспортом. По этой причине к унифицированным средствам перевозки не относятся.

Важным показателем контейнеров являются размеры их дверного проема в свету. От этого зависит степень универсальности контейнера, возможность использования погрузчиков и других машин для его загрузки и разгрузки, удобство выполнения грузовых операций в целом. Минимально допустимые внутренние размеры дверных проемов для контейнеров всех приведенных типоразмеров: 1АА, 1ВВ, 1СС и 1ДД-2330 x 2350 мм; 1А, 1В, 1С и 1Д-2330 x 2197 мм; УУК-5 1950 x x 2100 мм; УУКП-5 и УУКП-5(6)-1950 x 2280 мм; УУК-3 и УУК-3(5)-1225 x 2090 мм; УУКП-3(5) 1225 x 2300 мм; УУК-5У-1216 x x 2090 мм. У контейнеров АУК-1,25, АУК-0,625, УМКК-1,25 и УМК-1,25 двери расположены на боковой стороне, у остальных - на торцевой, имеющей меньшую длину. Присоединительные размеры на рымные узлы среднетоннажных контейнеров, на пазы для вилочных захватов средне- и крупнотоннажных контейнеров, на подхватные устройства для кранов с клещевыми захватами и на пазы-туннелики для крупнотоннажных контейнеров 1АА, 1А, 1АХ установлены ГОСТ 18477-79 (СТ СЭВ 772-77).

### 3.7 Седельный тягач

Таблица 3.1 – Характеристики седельного тягача

Модель	FT XF105 Space Cab Int
Кабина и подвеска кабины	Кабина Space Cab, механическая подвеска

Продолжение таблицы 3.1

Спойлер на крыше и манжеты	Регулируемый спойлер на крыше, боковые манжеты 2,55 м
Сиденье водителя	Сиденье водителя: Comfort Air
Сиденье второго водителя	Сиденье вт.водителя: базовая комплектация
Тахометр	Цифровой тахограф, VDO
Передняя ось	Передняя: 7,50 т, параболическая, 152N
Задняя ось	Задняя: 13,00 т, пневматическая подвеска, SR1347
Размер шин, запасное колесо	Отсутствует запасная шина
Шины поставщика	Goodyear
Шины 1 передние	F1,315/70R22.5GO LHS2HL 156/150 L Steering BB71-2
Шины 1 задние	R1,315/70R22.5GO LHD2+ 154/150 L Traction CC75-3
Запасная шина	SP, неприменимо
Двигатель и охлаждение	Двигатель 340 кВт (460 л.с.), MX340, 38 градусов
Выброс отработавших газов	Соответствует Euro 5
Остановка двигателя на холостом ходу	Без выключения двигателя на холостом ходу
Исполнение коробки передач	МКП, 16-ступенчатая
Привод коробки передач	Прямая высшая передача КПП
Тип коробки передач	Механическая, 16-ступ., 16S23.. серия
Передаточное число КПП	Передаточное число КПП 16,41-1,00
Передаточное число задней оси	Передаточное число задней оси 2,69
Система замедлителя	MX Engine Brake
Колесная база / задний свес	Колесная база 3,80 м / задний свес 0,99 м

Топливный бак	Алюм. топливные баки 850+430 л, высота 620 мм
Кронштейн запасного колеса	Отсутствует кронштейн запасного колеса
Цвет кабины	H3279/1 Brilliant White

### **3.8 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, металлорукава и т.д.

## 4 ВИДЫ ВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Общая характеристика тепловой отработки КА: этапы, структура и задачи отработки

Надежное математическое моделирование теплообмена большинства типов КА связано с рядом трудностей, обусловленных не столько недостатками математических методов и вычислительных средств, сколько сложностью и значительной неопределенностью протекания физических процессов внешнего и внутреннего теплообмена между элементами КА. Поэтому при создании КА большое значение имеет, так называемая, тепловая отработка, представляющая собой совокупность тепловых экспериментов (испытаний) и проводимых на основе их результатов мероприятий по доработке (в случае необходимости) средств обеспечения теплового режима, а иногда и конструкции аппарата.

Тепловая отработка может проводиться на различных стадиях создания КА: начиная с этапа научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ до летно-конструкторских испытаний. Для начальной стадии разработки КА характерны эксперименты, связанные с поиском и отработкой новых методов, схемных и конструктивных решений задач обеспечения теплового режима КА в целом или его отдельных частей, а также эксперименты, проводимые для подтверждения возможности получения требуемых технических характеристик систем КА. На последующих стадиях разработки КА можно выделить следующие три этапа тепловых испытаний:

- автономные испытания агрегатов КА для полной их автономной отработки. В качестве агрегатов могут рассматриваться как отдельные приборы, аппаратура, устройства, так и целые отсеки и системы;
- комплексные испытания систем КА, включающие ряд образующих взаимосвязанную совокупность агрегатов, работоспособность каждого из которых и условия работы взаимозависимы;

- комплексные испытания КА в целом.

Отмеченные этапы отражают один из принципов обработки техники: от “простого к сложному“. Этот принцип требует постепенного укрупнения и усложнения обрабатываемых частей КА.

В зависимости от особенностей обрабатываемого аппарата, наличия его прототипов и опыта отдельные этапы обработки могут исключаться или, наоборот, разбиваться на более мелкие этапы. Условием достаточности проведенного объема обработки КА является наличие сведений о реализующихся в неблагоприятных, но возможных условиях его работы, приемлемых параметрах теплового режима, а также о надежности их обеспечения.

По структуре тепловые испытания КА можно разделить на следующие типы:

- тепловакуумные испытания – испытания, связанные с моделированием космических условий полета или условий пребывания на поверхности не имеющих атмосферу небесных тел (Луны, астероидах);
- невакуумные испытания герметичных отсеков;
- испытания систем тепловой защиты, обеспечивающих сохранность конструкции, внутренний тепловой режим спускаемых с орбит аппаратов в условиях кинетического и радиационного нагрева, обусловленного аэродинамическим торможением;
- тепловые испытания с воспроизведением условий пребывания в атмосфере планет, в том числе на Земле (климатические тепловые испытания);
- вакуумно-температурные испытания, в процессе которых проверяется работоспособность каких - то узлов и механизмов КА в условиях реализации на элементах конструкции испытуемого объекта экспериментально или расчетно выявленных значений температур;
- ресурсные испытания и испытания на надежность элементов системы терморегулирования, оборудования и комплектующих элементов в условиях, имитирующих реальные тепловые условия эксплуатации;

- исследование работоспособности СОТР в условиях аварийной ситуации, т.е. при частичном или полном отказе отдельных элементов системы, нарушении герметичности, отклонении внутренних тепловыделений от значений, предусмотренных программой полета и т. д.;
- определение теплофизических параметров отдельных частей и элементов КА;
- исследование температурного поля в КА или его отдельных частях с целью коррекции математической модели его теплового состояния;
- проверка работы радиоэлектронной, оптической и другой аппаратуры в условиях реальных температур и температурных градиентов.

#### Проблемы тепловакуумной отработки КА

Среди отмеченных типов тепловых испытаний особое место по сложности, значимости и трудоемкости, связанной с расходом больших материальных ресурсов, занимают тепловакуумные испытания, отличительной особенностью которых является моделирование в экспериментальных установках космических условий полета или условий пребывания на поверхности не имеющих атмосферы небесных тел (Луна, астероиды). Подготовка такого рода испытаний сводится, главным образом, к деятельности по трем направлениям:

- моделирование испытываемого объекта;
- подготовке имитационных средств, способных с достаточной точностью воспроизводить основные факторы космического пространства, оказывающие влияние на тепловое состояние КА;
- планирование испытаний, связанное с определением наиболее целесообразных режимов испытаний, определением потребной продолжительности испытаний и т.п.

Достаточно точное моделирование испытываемого объекта является весьма важной задачей, решение которой в значительной степени определяет правомерность перенесения результатов испытаний на “натуру”. Основная трудность моделирования объекта испытаний связана с тем обстоятельством,

что в наземных условиях отсутствует имеющая место в космосе невесомость, влияние которой на тепловой режим проявляется через гидродинамику, гидростатику теплоносителей, а также через влияние на процессы конденсации и испарения. Возникают трудности, обусловленные необходимостью воспроизведения в процессе испытаний эффекта изменения радиационных характеристик наружных поверхностей КА, вызванного деградацией покрытий вследствие воздействия на них корпускулярного и жесткого электромагнитного излучения Солнца и воздействием на гладкие поверхности, в частности полированные, микрометеорных потоков. Существенные погрешности в модели объекта испытаний могут вноситься и за счет проводов, по которым выводится информация о температурах, давлении и других параметрах испытываемого объекта.

Несмотря на отмеченные сложности моделирования объекта испытания, решение задачи тепловакуумной отработки КА не вызывало бы особых затруднений, если бы в распоряжении экспериментаторов имелись имитационные средства, позволяющие с высокой точностью воспроизводить все факторы космической среды, оказывающие воздействие на тепловое состояние КА. Однако одновременное воспроизведение всех основных характеристик космического пространства – задача практически неразрешимая. Кроме того, как известно, на способ решения всякой сложной проблемы существенное влияние оказывают соображения организационного и экономического характера. При решении задачи моделирования физических характеристик космической среды экономические соображения имеют важное значение, поскольку между точностью воспроизведения условий космического пространства, стоимостью производства и эксплуатации имитационных средств существует прямая и весьма сильная связь.

Общепринятым является мнение о том, что работы по экспериментальному исследованию влияния факторов космического пространства целесообразно расчленять на группы видов воздействия. Считают, например, в [3,8,9], что при исследовании теплового режима КА в целом или его отдельных час-

тей и систем достаточно воспроизводить следующие факторы космического пространства: высокий вакуум, тепловое излучение Солнца и планет, практически полное отсутствие теплового излучения по тем направлениям, которые находятся за пределами телесных углов обзора Солнца и планет, а также практически полное поглощение собственного и отраженного излучения самого КА.

Воздействие факторов, оказывающих косвенное влияние на тепловой режим КА – ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца, корпускулярная радиация, микрометеорные потоки, исследуется отдельно в специальных установках. Полученные данные учитываются при составлении методики и программы комплексных и автономных испытаний КА посредством выбора режимов испытаний, ориентации испытываемого объекта в экспериментальной установке и режимов работы имитаторов Солнца и планет.

Несмотря на явное упрощение, связанное с разделением внешних факторов космической среды на группы, задача высокоточного моделирования условий внешнего теплообмена КА в наземных экспериментальных установках для широкого класса околопланетных аппаратов, например, околоземных, все еще является исключительно сложной не только в техническом, но и в методическом отношении. Сложности обусловлены тем, что в большинстве случаев возникает необходимость воссоздания в экспериментальной установке нестационарных во времени и пространстве лучистых полей, формируемых и Солнцем и планетой (чаще всего Землей). По ряду причин технического характера имитатор солнечного излучения обычно является неподвижным. Следовательно, для воспроизведения возможного изменения ориентации испытываемого объекта относительно потока солнечного излучения необходимо оснащение тепловакуумной установки устройством, позволяющим поворачивать испытываемый объект относительно двух взаимно перпендикулярных осей, расположенных в плоскости, перпендикулярной вектору  $\vec{S}$ . Кроме того при неподвижном имитаторе солнечного излучения имитируемое поле излучения планеты должно изменять свою ориентацию, что может быть

достигнуто либо за счет поворота имитатора излучения планеты относительно оси, перпендикулярной вектору  $\vec{S}$ , либо за счет использования специального и очень сложного имитатора с модулями, оснащенными приводами. Вращение КА относительно двух взаимно перпендикулярных осей практически осуществимо только для небольших КА. Для больших тяжелых КА не вызывает трудности лишь вращение относительно своей вертикальной оси, а вращение относительно двух осей – сложная техническая задача. Но еще более сложной задачей является воспроизведение поля излучения планеты, изменяющего свою пространственную ориентацию в камере.

Таким образом, экспериментальное моделирование тепловых режимов КА в условиях, максимально приближенных к натурным, сопряжено с большими техническими трудностями, несмотря на то, что имитационная техника, существующая в реальном воплощении или в технических проектах, позволяет воспроизводить каждый из отмеченных факторов с достаточной точностью. Сложности вызваны тем, что необходима техническая организация совместной работы имитационных систем и испытываемого объекта. Поэтому важное значение приобретают приближенные методы моделирования внешнего теплообмена.

Рассмотрим три приближенных метода моделирования внешнего теплообмена в тепловакуумных установках, оснащенных системами вакуумирования и криогенными экранами, имитирующими космический вакуум и идеальные поглощательные свойства космического пространства.

#### 1) Воспроизведение экстремальных внешних тепловых нагрузок.

Метод применяется в тепловакуумных установках, оснащенных помимо отмеченных систем вакуумирования и криогенных экранов имитатором солнечного излучения и имитатором поля излучения планет. В данном случае может осуществляться проверка теплового режима КА в условиях имитации наиболее неблагоприятных сочетаний внутренних тепловыделений и стационарных внешних тепловых нагрузок. Неблагоприятные сочетания выбираются на основании результатов расчета теплового режима КА при нали-

чии предположения о квазистационарности процессов внутреннего и внешнего теплообмена. Тепловакуумная установка с неподвижными имитаторами излучения Солнца и планеты должна быть оснащена устройством, позволяющим размещать испытываемый объект нужным образом по отношению к оптической оси имитатора Солнца. Получив при таком способе исследования положительную информацию о тепловом состоянии испытываемого объекта, можно быть уверенным в том, что в реальных, менее жестких тепловых условиях эксплуатации, требуемый тепловой режим КА будет обеспечиваться. Однако получение отрицательного результата не может служить убедительным доказательством недостаточной эффективности средств обеспечения теплового режима, так как условия эксперимента заведомо ужесточались.

2) Воспроизведение внешних тепловых нагрузок с помощью имитатора Солнца и упрощенного имитатора теплового воздействия планет.

Данный способ целесообразно применять в одном из двух случаев: тепловое состояние КА определяется главным образом воздействием солнечного излучения, а влияние планеты является второстепенным фактором; наружная поверхность гладкая и однородная в отношении радиационных характеристик. В этих условиях, используя опорно-поворотное устройство тепловакуумной установки, можно воспроизводить реальные ориентации КА относительно Солнца, что создает условия для достаточно точной имитации тепловых потоков от Солнца. Тепловое воздействие планеты воспроизводится с помощью упрощенных средств, например, совокупности условно линейчатых, точечных диффузных излучателей или излучающих панелей, размещенных вокруг рабочей зоны экспериментальной установки. Причем речь идет о воспроизведении расчетного теплового воздействия планет на элементы наружной поверхности испытываемого объекта, а не воспроизведении поля теплового излучения планет по основным параметрам - угловому распределению интенсивности и спектральному составу излучения.

Если использовать упрощенные имитаторы, то каждый раз возникает необходимость в воспроизведении таких пространственных законов распре-

деления подводимой к излучателям энергии, при которых в экспериментах достигается максимальная точность воспроизведения расчетных внешних тепловых нагрузок. В 80 - е годы в МАИ разработана методика и компьютерная программа определения оптимального режима работы таких имитаторов. Эта методика и программа успешно применяется на предприятиях аэрокосмической отрасли при проведении тепловакуумных вакуумно-температурных испытаниях изделий различного назначения.

3) Воспроизведение суммарных внешних тепловых нагрузок с помощью упрощенных излучающих систем и поверхностных электронагревателей.

При отсутствии в тепловакуумной установке имитатора солнечного излучения расчетные тепловые нагрузки от Солнца, планеты, а для низколетящих КА и тепловые потоки за счет столкновения с частицами атмосферного газа, можно воспроизводить с помощью уже вышеупомянутых упрощенных излучающих систем, расположенных на значительном расстоянии от испытываемого объекта, а также сетчатых секционированных излучателей, размещаемых в непосредственной близости от поверхности испытываемого объекта. Каждая секция такого излучателя участвует в облучении лишь определенного участка поверхности испытываемого объекта. Для приближенного моделирования внешнего теплообмена КА используются и так называемые конформные управляемые электронагреватели, представляющие собой регулируемые по мощности секции электронагревателей, устанавливаемые непосредственно на наружную поверхность испытываемого объекта. Такие электронагреватели называют также пленочными, поверхностными, а иногда и «нагревательными рубашками».

## 5 ТЕХНОЛОГИЯ СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНОЙ ОТКАЧКИ

### 1) Исходное состояние:

- электрическое снабжение отключено;
- клапаны, вентили, затворы, закрыты за исключением вентилей натекания VF1, VF2, VF3;
- насосы выключены;
- кнопки органов управления отжаты, тумблеры в положении «отключено», «выключено»;
- давление в вакуумной камере атмосферное;
- вакуумная камера открыта, крышка снята.

### 2) Подготовка к испытаниям:

- загрузка объекта испытаний, стыковка штепсельных разъемов к поверочной аппаратуре, газовых коммуникации при необходимости;
- закрытие крышки камеры;
- проверка плотности прилегания крышки по всей плоскости касания и усилие сжатия уплотнителя, не превышающее 15 [Н].

### 3) Вакуумирование:

- закрываются вентили натекания VF1, VF2, VF3 и открываются вентили VH1, VH2, VH3, VH4, VH6, VT1, для контроля давления деформационным манометрическим преобразователям P1;
- запускается насос предварительной откачки (золотниковый насос NL), осуществляется прокачка коллектора до запорной арматуры VA1;
- по показаниям манометрического преобразователя P1 открывается вентиль VA1 (давление ниже атмосферного);
- по показаниям деформационного манометрического преобразователя P1, при достижении давления  $10^4$  [Па] открывается клапан VT2 для контроля тепловым манометрическим преобразователем PT1;

- по достижению в магистрали давления 1 [Па] открывается клапан VA2;
- после достижения в магистрали от насоса до вентилях VA2 и VA4 и азотную ловушку BL давления в 1 Па открываются вентили VA2, VA4 и начинается откачка вакуумной камеры и магистрали от вентиля VA2 до вентиля VA3;
- для контроля давления в вакуумной камере открывается клапан VH6;
- по достижению в магистралях давления 1 [Па] открываются клапаны VT3, VT4, VT5, VT6, VT9, VT10 магнитных, ионизационных манометрических преобразователей PM1, PM2, PM4, PA1, PA2, PA4;
- при достижении давления запуска 0,01 [Па] турбомолекулярного насоса NR клапан VA4 закрывается, открывается вентиль VA3, начинается сверхвысоковакуумная откачка вакуумной камеры;
- по показаниям ионизационного манометрического преобразователя PA2, при достижении давления  $10^{-7}$  [Па], процесс сверхвысоковакуумной откачки вакуумной камеры заканчивается, закрывается вентиль VA3 и клапаны VT1, VT2, VT3, VT4, VT5, VT6 манометрических преобразователей;
- после закрытия вентиля VA3 открываются клапаны натекания VF1, VF2 и магистрали заполняются воздухом для предотвращения обратного тока газа (предохранение вакуумного коллектора от загрязнения углеводородами);
- после сверхвысоковакуумной откачки вакуумной камеры закрываются вентили VH1, VH2, VH3 на измерительных коллекторах манометрических преобразователей, питание с преобразователей снимается;
- открывается клапан VH4 для контроля давления магнитным и ионизационным манометрическими преобразователями PA3, PH3;
- включается криогенный насос NC, контроль давления осуществляется магнитным и ионизационным манометрическими преобразователями PA3, PH3;
- осуществляется прокачка коллектора до запорной арматуры VA5;

- при достижении давления в коллекторе  $7 \cdot 10^{-8}$  [Па] открывается клапан VA5;

- контроль степени вакуума в камере ведется по манометрическому преобразователю PA4;

- при аварийной ситуации: пропадание электроэнергии, прорыва атмосферы в коллектор, вакуумную камеру, измерительные коллекторы по сигналу манометрического преобразователя PM1, PM2, PM3, PM4 выключаются насосы, закрываются вентили на измерительные коллекторы и коллектора откачки. Открываются вентили натекания VF1, VF2, VF3.

## 6. РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ПРОПУСКНОГО ПУНКТА

Необходимо разработать контрольно-пропускной пункт (КПП) для Космодрома «Восточный». На базе КПП будет располагаться пропускное бюро. Данное КПП будет обеспечивать единый въезд в ЗАТО Циолковский и Космодром «Восточный» вместо 3-х отдельных КПП на данный момент.

Контрольно-пропускной пункт предназначен для осуществления охраны предприятия подразделениями вневедомственной охраны при органах внутренних дел.

Проект контрольно-пропускного пункта разработан в соответствии с:

- СНиП П 2.09.04-87 "Административные и бытовые здания;
- СНиП 12-01-2004 "Организация строительства";
- СНиП 3.03.01-87 "Несущие и ограждающие конструкции";
- ППБ-01-03 "Правила пожарной безопасности в Российской Федерации".

Здание запроектировано одноэтажным с высотой этажа 3,3 м. Материал для строительства здания пеноблок размером 600х300х200 для несущих стен, а для межкомнатных – 600х300х100. Рядом с КПП находятся 4 постовые будки для охраны.

В нем размещаются следующие помещения:

- Фойе;
- Пост охраны;
- Комната досмотра;
- Комната начальника караула;
- Комната инструктажа;
- Комната отдыха;
- Узел водоснабжения;
- Техническое помещение;
- Гараж;

- Комната приема пищи;
- Серверная;
- Архив;
- Кабинет делопроизводителя;
- Помещение специалистов;
- Начальник бюро пропусков;
- Санитарный узел;
- ОТСО.

Помещения здания должны быть оснащены: системой отопления (водяные регистры), с узлом технического учета тепловой и возможностью плавной регулировки расхода теплоносителя по 3 – каждой отходящей линии.

Основные показатели сетей теплоснабжения:

- системой водоснабжения (горячая и холодная вода) с техническим учетом расхода воды (с выводом информации на ПК) и подогревом воды при помощи ЭВН. Тепловой узел и узел учёта тепловой энергии разместить в помещении узла водоснабжения;
- индивидуальной, в каждом помещении, системой поддержания микроклимата в помещениях (обеспечение возможности вручную регулировать подачу теплоносителя в каждый тепловой регистр);
- системой видеонаблюдения;
- системой пожарно-охранной сигнализации;
- локальными компьютерными и телефонными сетями. Сервер должен находиться в отдельной комнате и не иметь свободного доступа;
- системой электроснабжения с техническим учётом электроэнергии. Электроснабжение ПК от общего ИБП.

Основные требования КПП:

- расположение здания КПП согласно общей планировке базы;
- расположить 4 шлагбаума, рядом с которыми будут постовые будки охраны, а также эстакаду для осмотра грузовых автомобилей;

- КПП должны иметь две отдельные, независимые сети электроосвещения: рабочую и аварийную.

Технические требования, предъявляемые к канализационным сетям бытовых стоков:

- для слива бытовых стоков предусмотреть устройство септика (проектирование сбора бытовых отходов не требуется) ;

- объем септика не менее чем двухнедельный объем бытовых стоков, но не менее 20 м<sup>3</sup>;

- септик для сбора бытовых и промышленных отходов должен иметь люк, обеспечивающий доступ (прохода человека вовнутрь емкости) для очистки внутренней поверхности и откачки отходов.

Технико-экономические показатели:

- Площадь застройки – 310 м<sup>2</sup>;

- Кубатура здания – 1023 м<sup>3</sup>;

- Количество смен – 3;

- Количество работников одновременно прибывающих в помещении – 21.

В комнате досмотра необходимо установить турникеты TTR-04.1 в количестве 4 единиц. Их габаритные размеры 855x810x1050 мм.

Также необходимо установить шлагбаумы фирмы DOORHAN BARRIER PRO на въезде и выезде. Стрела шлагбаума данного производителя может быть от 3 до 6 метров.

Данное оборудование было выбрано по размерам и экономическим параметрам.

## 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, прошедший медицинское освидетельствование, сдавший 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 преобразователи ВДГ-1, ВТСО, ВМБ-14, ВИ-14;
- 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 инструмент 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.

### **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 электро-схемы 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 отпусканием кнопки 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 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.

Работы с системой зарядки сжатыми газами допускаются лица, прошедшим 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.

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 срочно 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 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:

- устранять неисправности электрооборудования, находящегося под напряжением;
- касаться токоведущих частей и проводить их обтирку и чистку под напряжением;

- снимать предупредительные плакаты;
- устанавливать и снимать предохранители при поданном напряжении;
- подсоединять и отсоединять кабели при поданном напряжении;
- подключать в гнезда оголенные концы проводов;
- 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 отключить от электрической сети часть установки, которой касается пострадавший;
2. Срочно вызвать врача;
3. Уложить пострадавшего на спину на ровную и твердую поверхность;
4. Распустить 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.

### **7.5 Меры пожарной безопасности**

При работе в помещениях вакуумной станции необходимо соблюдать следующие меры пожарной безопасности (ГОСТ 12.2.037-78):

- иметь средства для тушения пожара и тщательно следить за его исправным состоянием;
- не допускать утечки масла из насосов;

- не допускать проливов при замене масла;
- не допускать хранения легковоспламеняющихся жидкостей (спирт, бензин, масла, краски) на рабочем месте;
- не допускать хранения отработанных протирочных материалов;
- при попадании легковоспламеняющихся жидкостей на спецодежду, последнюю перед использованием необходимо тщательно просушить;
- не допускать курения и применения открытого огня.

В случае возникновения пожара необходимо:

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

## **7.6 Меры безопасности при выполнении подъемно-перегрузочных работ и на высоте**

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 погрузо-разгрузочных работ с применением грузоподъемных машин запрещается:

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

При работе на высоте (свыше 1,5 м над уровнем пола) запрещается:

- перелезать через ограждения площадок и лестниц;
- переходить по незакрепленным конструкциям и работать на них;
- 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.

В разделе безопасность жизнедеятельности, были сформулированы необходимые правила работы обслуживающего персонала, которые направлены на предотвращение травматизма и гибели рабочих, а также для избежания преждевременного выхода из строя дорогостоящего оборудования испытательного оборудования. В разделе был рассмотрен перечень работ обслуживающего персонала на испытательной установке. Он включает:

1. Правила безопасной работы при использовании масс-спектрометрического метода поиска негерметичности;
2. Меры безопасности при работе с криогенными компонентами (жидким азот);
3. Меры безопасности при работе с электрооборудованием;
4. Меры пожарной безопасности;
5. Меры безопасности при работе на высоте;
6. Меры безопасности при погрузочно-разгрузочных работах.

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

## 8 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В данной части дипломного проекта приводится расчет экономической целесообразности проектирования вакуумной установки для испытаний малых космических аппаратов.

Для оценки экономической целесообразности разрабатываемой установки необходимо рассчитать затраты на её проектирование.

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. Это упрощение сделано для того, чтобы показать целесообразность внедрения установки на предприятиях, где её ценность определяется сэкономленными ею средствами.

В себестоимость работы 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.

Рассмотрим более подробно затраты на проектирование вакуумной установки для испытаний малых космических аппаратов.

Расходные материалы, необходимые для проектирования данной установки, включает в себя: программное обеспечение MS Office 2019, КОМПАС

v18, 9 листов формата A0. В таблице 8.1 приведен расчет затрат на расходные материалы. Сумма затрат рассчитывается исходя из цены и количества необходимых материалов, цены – рыночные.

Таблица 8.1 – Затраты на расходные материалы

Наименование оборудования	Количество	Цена, руб.	Сумма затрат, в руб.
Канцелярские товары	-	-	900,00
Программное обеспечение MS Office 2019	1 шт.	5500	5500
КОМПАС v18	1 шт.	1490	1490
Лист формата A0	9 шт.	132	1188
Бумага для офисной техники	1 пачка	250	250
Тонер для принтера HP DesignJet T125	1 шт.	2199	2199
Итого			11327

Затраты по основной заработной плате работников рассчитываются исходя из этапов проведения работ по созданию установки, их продолжительности, трудоемкости данного процесса и среднемесячной зарплаты работников. Трудоемкость характеризует затраты рабочего времени на производство единицы продукции или работы. В данном случае, труд, затраченный на выполнение каждого этапа проектирования, выражается в человеко-месяц. Это означает, что день, затраченный на выполнение этапа проектирования, равен 8 часам, а месяц – 21 рабочий день.

Расчет затрат на основную заработную плату работников приведен в таблице 8.2

Таблица 8.2 – Затраты на основную заработную плату работников

Наименование этапа	Трудо- емкость этапа, чел/день	Трудо- емкость этапа, чел/мес.	Заработная плата, руб.	Затраты по заработной плате, руб.
Разработка техниче- ского задания	2	0,09	12130,00	1091,7
Изучение литературы	1	0,05	12130,00	606,5
Разработка структур- ной схемы	3	0,14	12130,00	1698,2
Разработка принципи- альной схемы	3	0,14	12130,00	1698,2
Разработка функцио- нальной схемы	3	0,14	12130,00	1698,2
Разработка конструк- ции	5	0,24	12130,00	2911,2
Изготовление рабочих чертежей	7	0,33	12130,00	4002,9
Построение графиков (проверка расчетов)	3	0,14	12130,00	1698,2
Подготовка докумен- тации	1	0,05	12130,00	606,5
Итого				16011,6

Дополнительная заработная плата разработчиков составляет 20% от основной заработной платы:

$$16011,6 \cdot 20\% / 100\% = 3202,32 \text{ рублей.}$$

Страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования составляют 30,2% от фонда оплаты труда:

$$(16011,6+3202,32) \cdot 30,2\% / 100\% = 5820,6 \text{ рублей.}$$

Обычно накладные расходы составляют 180-250% от величины основной заработной платы. При проектировании и создании данной установки примем их равными 180%:

$$16011,6 \cdot 180\% / 100\% = 28820,88 \text{ рублей.}$$

Прочие расходы включают стоимость машинного времени на разработку, отладку, и подготовку технической документации и рассчитываются по формуле:

$$Z_{пр} = N \cdot C_{мч} \cdot K_{загр}, \quad (8.1)$$

где  $N$  – количество часов, необходимых на создание, отладку, и подготовку технической документации,

$C_{мч}$  – стоимость машино-часа, включающая стоимость профилактических работ, потребляемой электроэнергии, расходных материалов, равная 50 рублей,

$K_{загр}$  – коэффициент загрузки ПЭВМ, равный 0,7-0,9, в данном случае он равен 0,7.

$N$  рассчитаем исходя из таблицы 2, учитывая дни затраченные на выполнение этапов, принимая, что каждый день работы длились 8 часов:

$$N = (3 + 3 + 3 + 5 + 7 + 3 + 1 + 3) \cdot 8 = 224 \text{ часов.}$$

$$Z_{пр} = 224 \cdot 50 \cdot 0,7 = 7840,00 \text{ рублей.}$$

Сведем полученные данные по затратам на приобретение расходных материалов, основную и дополнительную заработную плату рабочих, затраты по страховым взносам в пенсионный фонд и фонды социального страхования, накладные и прочие расходы в единую таблицу. Себестоимость проектирования вакуумной установки для испытаний малых космических аппаратов представлена в таблице 8.3.

Таблица 8.3 – Себестоимость проектирования установки

Наименование статей расходов	Затраты, руб
Затраты на приобретение расходных материалов	11327
Затраты на основную заработную плату разработчиков	16011,6
Затраты на дополнительную заработную плату разработчиков	3202,32
Затраты на страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования	5820,6
Накладные расходы	28820,88
Прочие расходы	7840,00
Итого	73022,4

Таким образом, итоговая себестоимость проектирования вакуумной установки для испытаний малых космических аппаратов составила 48974,36 рублей.

Для анализа себестоимости проектирования и создания установки составим таблицу процентного содержания затрат.

Таблица 8.4 – Себестоимость проектирования установки в процентах

Наименование статей расходов	Затраты, %.
Затраты на приобретение расходных материалов	16
Затраты на основную заработную плату разработчиков	22
Затраты на дополнительную заработную плату разработчиков	4
Затраты на страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования	8
Накладные расходы	40
Прочие расходы	10
Итого	100

Наглядное соотношение процентного содержания затрат в себестоимости представлено на рисунке 8.1

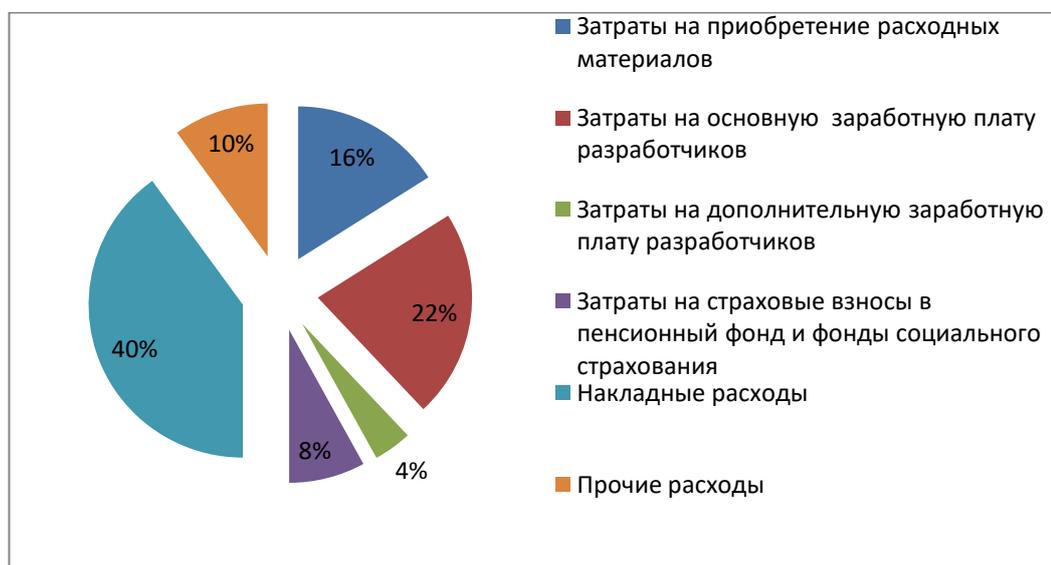


Рисунок 8.1 – Себестоимость проектирования установки в процентном отношении

Как видно на диаграмме, наибольшую долю в себестоимости на проектирование и создание установки составляют затраты на накладные расходы - 40%, наименьшую долю имеют прочие расходы и затраты на дополнительную заработную плату разработчиков, которые составляют 4% из общей себестоимости.

Несмотря на высокую себестоимость проектирования вакуумной установки для испытаний малых космических аппаратов, её косвенный экономический эффект от внедрения очевиден. До сегодняшнего момента в мире подобной установки не существовало, а это означает, что значительные средства тратятся на изучение, исследование данной проблематики, на создание схожих установок, проведение испытаний, оплаты данной работы специалистам. При создании данной вакуумной установки для испытаний малых космических аппаратов резко сократятся затраты на эти процессы, произойдет высвобождение средств за счет уменьшения затрат на заработную плату работников, занимающихся решением схожих вопросов, затрат на исследования,

затрат на изготовление опытных образцов, проведение испытаний и проверок.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной выпускной квалификационной работы, был проведен перечень подлежащих разработке разделов и этапов выполнения.

Проектный расчет вакуумной системы, включающий в себя расчет величины потока газов, выбор вакуумной системы.

Описание установки, содержащее описание конструкции, выбор подходящих по расчетам насосов, трубопроводов, манометров. Так же были выбраны соответствующие элементы системы откачки.

Описание видов вакуумных испытаний. Так же были выделены проблемы тепловакуумной отработки космических аппаратов.

Технологическая часть, содержащая последовательность операций технологии сверхвакуумной откачки. Технология, описанная в разделе, приведена в виде алгоритма технологического процесса.

Специальная часть, целью которой является спроектировать контрольно-пропускной пункт для Космодрома «Восточный».

В итоге выполнения специальной части выпускной квалификационной работы был разработан контрольно-пропускной пункт и описаны системы безопасности и коммуникации.

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.

Приведено экономическое обоснование разработки и внедрения установки для испытаний малых космических аппаратов.

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

В заключение стоит отметить что, мобильность разработки влечет за собой теоретическую, практическую и экономическую выгоду использования представленной вакуумной установки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Конструирование и расчет вакуумных систем/ Пипко А.И [и др.] – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 504 с.
- 2 Кузьмин В.В. Расчет и проектирование вакуумных машин и установок. / В.В. Кузьмин — Лабораторный практикум – 2000. – 19с.
- 3 Подходы к созданию комплексных систем для отработки и испытания космических аппаратов /С.В. Кравченко [и др.] // УДК 621.528.1 – 27с.
- 4 Технологическое вакуумное оборудование. Часть 1: вакуумные системы технологического оборудования : учебник / Л.В. Кожитов [и др.] – М.:МГИУ, 2010. -444с.
- 5 Вакууметры [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://zcvc.ru/cat/114/%D0%B2%D0%B0%D0%BA%D1%83%D1%83%D0%BC%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D1%8B>– 26.05.2020.
- 6 Гелиевый масс-спектрометрический течеискатель ТИ1-50 [Электронный ресурс] – Режим работы: <http://www.spbizmerit.ru/helium-leak-detector-ti1-50.html>– 28.05.2020.
- 7 Имитаторы космоса [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://erstvak.com/catalog/vakuumnaya-sistema-ustanovka/imitator-kosmosa/> - 05.05.2020.
- 8 Монтаж вакуумных трубопроводов [Электронный ресурс] - Режим доступа : <https://montazhpro.ru/montazh-i-ispytaniya-truboprovodov-specialnogo-naznacheniya/montazh-vakuumnyx-truboprovodov/>– 25.05.2020.
- 9 Общая характеристика тепловой отработки КА: этапы, структура и задачи отработки [Электронный ресурс] – Режим работы: <https://studfile.net/preview/6711399/page:2/>– 29.05.2020.
- 10 Регион – новые технологии [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://ufk-techno.ru/1563.htm> – 24.05.2020.
- 11 Энциклопедия Кругосвет. Вакуумная техника [Электронный ресурс] – Режим доступа:

[https://www.krugosvet.ru/enc/nauka\\_i\\_tehnika/tehnologiya\\_i\\_promyshlennost/VA\\_KUUMNAYA\\_TEHNIKA.html](https://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/tehnologiya_i_promyshlennost/VA_KUUMNAYA_TEHNIKA.html)– 24.05.2020.