

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

Факультет: Инженерно-Физический

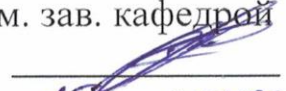
Кафедра: Стартовые и технические ракетные комплексы

Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика

Направленность (профиль) образовательной программы – Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зам. зав. кафедрой


В. В. Соловьев
« 15 » июня 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

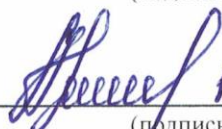
на тему: Проектирование вакуумной промышленной установки большого объёма для испытаний крупногабаритных объектов

Исполнитель
студент группы 717-об

 14.06.2021
(подпись, дата)

Т. П. Пыресев

Руководитель
доцент, к. т. н.

 14.06.2021 г.
(подпись, дата)

А. В Козырь

Научный консультант

 14.06.21
(подпись, дата)

К. А. Насуленко

Консультант по БЖД
Канд. физ.-мат. наук

 14.06.2021
(подпись, дата)

В. Н. Аверьянов

Нормоконтроль

 14.06.2021
(подпись, дата)

М. А. Аревков

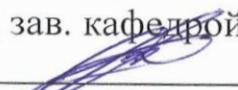
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АМГУ»)

Факультет: Инженерно-Физический

Кафедра: Стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ

Зам. зав. кафедрой


В. В. Соловьев

« 26 » Апреля 2021 г.

ЗАДАНИЕ

к выпускной квалификационной работе студента *Пыресева Тимофея Петровича*

1. Тема выпускной квалификационной работы: Проектирование вакуумной промышленной установки большого объёма для испытаний крупногабаритных объектов

(утверждена приказом от 05.04.2021 №658-уч)

2. Срок сдачи студентом законченного проекта: 15.06.2021 г.;

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: Вакуумная камера горизонтального типа длиной $L \approx 15,5$ м, $D \approx 9$ м; рабочее давление $P_{ост} = 10^{-8}$ Па; время откачки камеры до рабочего давления не более 24 ч;

4. Содержание выпускной квалификационной работы: общие сведения об вакуумных системах и установках, проектный расчет вакуумной системы, расчет на прочность, описание вакуумной установки, безопасность жизнедеятельности, экономическая часть;

5. Перечень материалов приложения: общий вид, общий вид с разрезами, схема членения, схема вакуумной системы, алгоритм испытаний, ребро жесткости, фланцевое соединение, кольцо жесткости, опора седловая, эпюры сил и моментов;

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

Консультант по БЖД: Аверьянов В. Н., канд. физ.-мат. наук;

7. Дата выдачи задания: 26.04.2021 г.;

Руководитель выпускного квалификационного проекта: Козырь А. В., канд. тех. наук.

Задание принял к исполнению (дата): 26.04.2021 г.



РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 83 страницы, 18 рисунков, 19 источников.

ВАКУУМНАЯ КАМЕРА, ВАКУУМ, КРИОГЕННЫЙ НАСОС, ТЕЧЕИСКАТЕЛЬ, ИМИТАТОРЫ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА, ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ, ТРУБОПРОВОД, ВАКУУМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Цель работы – проектная разработка промышленной вакуумной камеры большого объема для испытаний крупногабаритных объектов.

Задачи:

- 1) Провести проектный расчет вакуумной системы;
- 2) Провести прочностной расчет вакуумной камеры;
- 3) Составить описание вакуумной установки;
- 4) Описать меры безопасности при работе на вакуумной установке;
- 5) Провести расчет экономических затрат на проектирование и создание опытного образца вакуумной камеры.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Общие сведения об вакуумных системах и установках	8
1.1 Применение вакуумной техники	8
1.2 Разновидность вакуумной техники	9
1.3 Вакуумные насосы	9
1.4 Вакуумные системы	10
1.5 Вакуумные печи	10
1.6 Вакуумная арматура	11
1.7 Вакуумметры	11
2 Проектный расчет вакуумной системы	12
2.1 Расчет величины потока газов поступающего в вакуумную систему	12
2.2 Выбор компоновочной схемы вакуумной системы	18
2.3 Выбор вакуумных насосов	19
2.3.1 Выбор криогенного насоса	19
2.3.2 Выбор турбомолекулярного насоса	21
2.3.3 Выбор двухроторного диффузионного насоса	21
2.3.4 Выбор механического золотникового насоса	23
2.4 Определение размеров трубопроводов и выбор вакуумной арматуры	24
2.4.1 Сверхвысоковакуумная система	24
2.4.2 Высоковакуумная система	31
2.4.3 Область среднего вакуума	36
2.4.4 Область низкого вакуума	42
3 Расчет на прочность	46
3.1 Обеспечение прочности конструкции	46
3.2 Эпюры сил и моментов	46
3.3 Вес элементов вакуумной установки	48

3.4	Расчет на прочность крышки с рёбрами	49
3.5	Расчет на прочность цилиндрической обечайки	55
3.6	Расчет на прочность кольца жёсткости	62
3.7	Расчет на прочность днища торосферического	64
4	Описание вакуумной установки	67
4.1	Вакуумные испытания КА	67
4.1.1	Технические параметры вакуумной камеры для проведения вакуумных испытаний	67
4.1.2	Система вакуумирования	68
4.1.3	Система разгерметизации	69
4.1.4	Система подачи жидкого азота	69
4.1.5	Система имитаций солнечного излучения	71
4.2	Работа участка вакуумных испытаний КА	71
5	Безопасность жизнедеятельности	73
5.1	Общие положения по правилам и мерам безопасности при работе на вакуумной установке	73
5.2	Меры безопасности при испытаниях КА в вакуумной камере	74
5.3	Меры безопасности при работе со сжатыми газами	75
6	Экономическая часть	76
6.1	Стоимость проектирования вакуумной установки	76
6.2	Оценка косвенного экономического эффекта	80
	Заключение	81
	Библиографический список	82

ВВЕДЕНИЕ

Для создания на Земле условий, близких к условиям космического пространства используют специальные вакуумные установки. Такие камеры называют имитаторами космоса. Внутри устанавливают специальные системы для имитации факторов космического пространства. К таким системам относятся:

- система вакуумирования;
- система имитации солнечного излучения;
- система имитации «холодного» космоса.

Система вакуумирования предназначена для создания в камере низкого давления порядка 10^{-8} Па. Создание вакуума в камере позволяет приблизить условия отсутствия какой-либо среды аналогично космическому пространству. Для понижения давления в камере используют специальные вакуумные насосы, которые способны создавать «стерильный» вакуум и поддерживать его продолжительное время.

Имитаторами солнечного излучения, как правило, являются инфракрасные лампы. Они создают необходимый тепловой поток и нагревают объект испытаний аналогично тому, как солнечные тепловые потоки воздействуют на космический аппарат.

Для имитации «холодного» космоса используют так называемые криогенные экраны. Они представляют собой радиаторы с трубками внутри которых находится криогенное вещество, как правило, им является жидкий азот. Он охлаждает экран до температуры порядка 77 К воспроизводя температуру открытого космоса.

Все эти системы предназначены для создания условий близких к условиям открытого космоса, позволяя проверить готовность компонентов и узлов космических аппаратов на правильность функционирования при воздействии на них факторов космического пространства.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ И УСТАНОВКАХ

Вакуум (от лат. *vacuus* – пустота) – пространство, свободное от вещества. В технике и физике вакуумом является среда, состоящая из вещества, находящегося при давлении значительно ниже атмосферного. Вакуум как правило характеризуется отношением длины свободного пробега молекул λ и характерным размером среды d . Под размером среды может подразумеваться расстояние между стенками камеры, диаметр трубопровода и т. д. В зависимости от величины данного отношения λ/d различают низкий ($\lambda/d \ll 1$), средний ($\lambda/d \approx 1$) и высокий ($\lambda/d \gg 1$) вакуум.

В настоящее время большинство отраслей промышленности использует вакуумное оборудование для различных целей. Данный вид техники позволяет создавать, поддерживать и использовать вакуум для различных технических целей.

1.1 Применение вакуумной техники

Вакуумное оборудование обладает множеством преимуществ, благодаря которым его применяют не только в научно-исследовательских сферах, но и в других областях таких как:

- в химической промышленности с помощью вакуума создают вещества);
- в атомной энергетике с помощью вакуума создают безвоздушную среду для проведения исследований;
- в авиационной и космической промышленности вакуум используют для проведения испытаний;
- в электронике используется для создания сверхчистых материалов при изготовлении электрооборудования;
- в биологии вакуумное оборудование используется при проведении лабораторных исследований;

– в пищевой промышленности для увеличения срока хранения продуктов используют вакуумные упаковки;

– в горной промышленности с помощью вакуумного оборудования производят откачку агрессивных сред.

Как итог, на сегодняшний день в промышленности повсеместно используют вакуумные устройства и оборудование. Так как эта техника является универсальной, то ее можно применять в различных сферах и областях жизнедеятельности человека.

1.2 Разновидности вакуумной техники

В большинстве современных отраслей вакуумное оборудование превосходит обычные системы. Среди разновидностей всей вакуумной техники можно выделить основные виды вакуумного оборудования, используемое при проведении различных видов работ, к ним относятся:

- вакуумные системы;
- печи;
- вакуумные насосы;
- вакуумная арматура.

Для изготовления вакуумного оборудования могут применяться различные материалы: черные и цветные металлы, керамика, стекло, резина и т. д.

Среди материалов, используемых для создания вакуума различной степени, широкое распространение получила вакуумная резина, которая используется для изготовления уплотнителей, мембран и перегородок.

1.3 Вакуумные насосы

Это оборудование получило широкое распространение среди вакуумных устройств. Вакуумные насосы используют для создания разрежения в закрытом пространстве путем откачивания воздуха и водяных

Как правило вакуумные насосы можно разделить на 3 основных вида:

- первичные (для создания низкого вакуума);
- вторичные (для создания высокого вакуума);

– дожимные насосы (низкий вакуум).

Исходя из классификации можно сказать, что вакуумные насосы могут использовать для разных целей, однако принцип действия насосов остается неизменным.

Также в отдельную группу выделяют масляные и безмасляные насосы. Конструкция насоса влияет на использование масла или другого вещества для смазывания и уплотнения деталей. Также необходимо учитывать, что при использовании масляного насоса газ, перекачиваемый через рабочий объем будет загрязняться, так как на него в процессе работы насоса будут воздействовать смазывающие вещества.

1.4 Вакуумные системы

Данный вид техники назван системой так как является установкой, которая включает в себя элементы различного вакуумного оборудования. Основными элементами такой системы являются камера и вакуумный насос.

Также система имеет дополнительное оборудование к которому относятся:

- трубопроводы – предназначены для соединения элементов системы;
- различного рода арматура позволяющая измерять состояние системы;
- контроллер – используемый для управления системой в целом.

1.5 Вакуумные печи

Вакуумные печи используются во многих отраслях промышленности. Это оборудование получило широкое применение в атомной и космической промышленности. Главным преимуществом вакуумных печей является то, что они позволяют создавать разрежение воздуха в рабочей области, тем самым удаляя вредные примеси.

Поскольку при выплавке металлов отсутствуют частицы, которые могут привести к браку, материал в результате получается однородным и чистым. При этом, производя обработку в вакуумных печах, материалы и детали приобретают высокие показатели прочности.

Корпус печи выполняется из сплавов стали, а система оснащается насосом и необходимой запорной арматурой для удаления воздуха и примесей из рабочей камеры.

1.6 Вакуумная арматура

Вакуумной арматурой являются различного рода элементы, позволяющие организовать нормальную работу вакуумного оборудования к таким элементам относятся различные уплотнения, заглушки, клапаны, сильфоны, ловушки и т.д.

Также к ним можно отнести различного рода мановакуумметры, которые представляют собой приборы для измерения давления газов, находящихся в вакуумном пространстве.

1.7 Преимущества и недостатки вакуумного оборудования

В целом вакуумное оборудование дает лучшие показатели по сравнению с обычными системами. Также оно обладает рядом преимуществ:

- скорость работы;
- широкое применение техники в различных сферах;
- качественное оборудование у надежных производителей;
- стабильность и надежность;
- хорошие показатели производительности;
- универсальность – в зависимости от типа оборудования, его можно применять в различных сферах и для реализации разнообразных целей;
- дает возможность проведения работ, которые невозможно реализовать при атмосферном давлении;
- ускоряет процессы и уменьшает время, затраченное на выполнение определенной работы.

Недостатками вакуумного оборудования является, как правило, это стоимость и большие габариты отдельных моделей

2 ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

Основной задачей проектного расчета вакуумной системы является приблизительный расчет величины потока газов откачиваемого из вакуумной камеры и поступающего в вакуумную систему через неплотности и слой материала. Исходя из результатов расчета, производят выбор видов и моделей вакуумных насосов, а также вакуумной схемы установки, и определяют конструктивные размеры трубопроводов и выбирают необходимые элементы вакуумной системы.

2.1 Расчет величины потока поступающего в вакуумную камеру

Исходные данные:

$$P_0 = 10^5 \text{ [Па];}$$

$$P_{\kappa} = 10^{-8} \text{ [Па];}$$

$$t_{\text{пред}} = 200 \text{ [мин];}$$

$$t_{\text{откач}} = 24 \text{ [час].}$$

Зная необходимое рабочее давление в вакуумной камере $P_{\kappa} = 10^{-8}$ [Па]. В качестве основного насоса выбираем криогенный насос. Для того чтобы запустить данный насос необходимо создать в камере пониженное давление порядка 1 [Па].

Для создания указанного предварительного разрежения в вакуумной камере выбираем двухроторный вакуумный насос, предельное давление которого 10^{-2} [Па].

Для создания низкого вакуума выбираем механический золотниковый насос, который способен создавать разрежение порядка 1 [Па].

Так как в техническом задании отсутствует величина потока газов, считаем ее:

1) Расчет общего потока газов, поступающих извне в вакуумную систему:

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

2) Определим газовый поток $Q_{изд}$, выделяющихся из объекта, находящегося в вакуумной камере:

$$Q_{изд} = Q_{нерж} + Q_{крем} \quad (2)$$

где $Q_{нерж}$ – поток газов, которая выделяется из нержавеющей части,
 $Q_{крем}$ – поток газов, которая выделяется из солнечных панелей.

$$Q_{нерж} = q_{нерж} \cdot A_{нерж} \quad (3)$$

$$Q_{крем} = q_{крем} \cdot A_{крем} \quad (4)$$

где $q_{нерж} = 1,2 \cdot 10^{-8}$ [м³Па/(м²с)];

$q_{крем} = 2,4 \cdot 10^{-6}$ [м³Па/(м²с)].

Площадь солнечных батарей космического аппарата (КА):

$$A_{крем} = 60 \text{ [м}^2\text{]}.$$

Расчет площади испытываемого КА:

$$A_{нерж} = 2(ab + bc + ac), \quad (5)$$

где a, b, c – габаритные размеры испытываемого КА,

$$a = 6,5 \text{ [м]};$$

$$b = 4,5 \text{ [м]};$$

$$c = 2,5 \text{ [м]}.$$

$$A_{нерж} = 2 \cdot (6,5 \cdot 4,5 + 4,5 \cdot 2,5 + 6,5 \cdot 2,5) = 113,5 \text{ [м}^2\text{]}.$$

Расчет потока газов выделяемых из нержавеющей части по формуле (3):

$$Q_{нерж} = 1,2 \cdot 10^{-8} \cdot 113,5 = 136,2 \cdot 10^{-8} \text{ [м}^3\text{Па/с]}.$$

Расчет потока газов выделяемых из нержавеющей части по формуле (4):

$$Q_{крем} = 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 60 = 144 \cdot 10^{-6} \text{ [м}^3\text{Па/с]}.$$

Расчет потока газов, выделяющихся из изделий в вакуумной камере по формуле (2):

$$Q_{изд} = 136,2 \cdot 10^{-8} + 144 \cdot 10^{-6} = 14536,2 \cdot 10^{-8} \text{ [м}^3\text{Па/с]}.$$

Окончательно после приведения к комнатной температуре:

$$Q_{изд} = 7336,2 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{293}{373} = 11,42 \cdot 10^{-5} \text{ [м}^3\text{Па]}.$$

3) Расчет величины газового потока, через неплотности, в узлах соединения камеры, полагая, что число возможных мест натекания газа $n = 20$. Так как проверка натечек осуществляется масс–спектрометрическим течеискателем с чувствительностью $\gamma = 7 \cdot 10^{-13} \text{ [м}^3\text{Па/с]}$, то:

$$Q_{нат} = n \cdot \gamma = 20 \cdot 7 \cdot 10^{-13} = 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ [м}^3\text{Па/с]}.$$
 (6)

4) Расчет величины $Q_{газ}$ выделяющихся с поверхностей элементов внутри вакуумной камеры:

$$Q_{газ} = \sum_i A_i \cdot q_i,$$
 (7)

где A_i – площадь поверхности i – го элемента находящегося в вакуумной камере;

q_i – удельное газовыделение с поверхности материалов. Для резиновых изделий берём из зависимости скорости удельного газовыделения резин различных марок от степени их прогрева (рисунка 1).

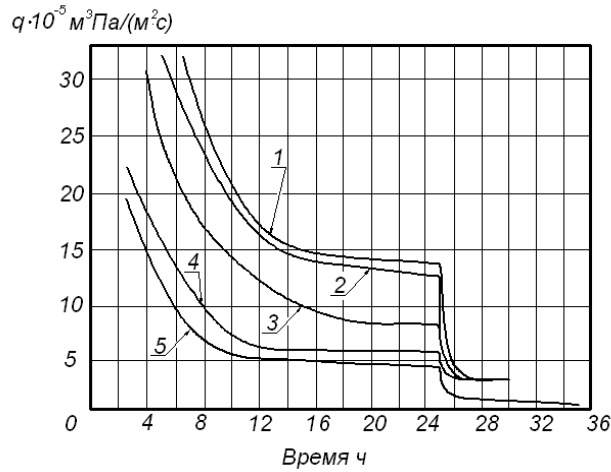


Рисунок 1 – Зависимость скорости удельного газовыделения q_i для вакуумных резин различных марок от времени прогрева: 1 – резина марки 1015 при 77 [°C]; 2 – резина марки 9024 при 77 [°C]; 3 – резина марки 14P-23 при 200 [°C]; 4 – резина марки 14P-2 при 147 [°C]; 5 – резина марки 7889 при 167 [°C].

Все элементы вакуумной системы будут выполнены из стали 12X18H10T, а резиновые элементы из вакуумной резины марки 7889. Тогда удельные газовыделения для элементов будут равны:

- для резиновых уплотнителей: $q_{резин\ упл} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})]$;
- для нержавеющей стали: $q_{корп} = q_{крыш} = q_{подст} = q_{днища} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})]$;
- для алюминиевого экрана: $q_{экр\ (нерж)} = 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})]$;
- для никелевого нагревателя: $q_{нагр} = 6,55 \cdot 10^{-6} \text{ [м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})]$.

$$Q_{газ} = Q_{корп} + Q_{крыш} + Q_{подст} + Q_{экр\ (Al)} + Q_{днища} + Q_{нагр} + Q_{резин\ упл} \quad (8)$$

$$Q_{корп\ (обеч)} = \pi \cdot D \cdot L \cdot q_{корп} \quad (9)$$

$$Q_{корп\ (обеч)} = 3,14 \cdot 9 \cdot 13 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 440,86 \cdot 10^{-8} \text{ [м}^3 \text{Па}/\text{с}].$$

$$Q_{\text{корн(штуц)}} = \pi \cdot d \cdot h \cdot q_{\text{корн}} \quad (10)$$

$$Q_{\text{корн(штуц)}} = 3,14 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,942 \cdot 10^{-8} \text{ [м}^3\text{Па/с]}.$$

$$Q_{\text{крыш(штуц)}} = \left(\pi \cdot \frac{D^2}{4} \right) \cdot q_{\text{крыш}} \quad (11)$$

$$Q_{\text{крыш(штуц)}} = \left(3,14 \cdot \frac{0,5^2}{4} \right) \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 0,24 \cdot 10^{-8} \text{ [м}^3\text{Па/с]}.$$

$$Q_{\text{крыш(плос)}} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot q_{\text{крыш}} \quad (12)$$

$$Q_{\text{крыш(плос)}} = 3,14 \cdot \frac{9^2}{4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 76,3 \cdot 10^{-8} \text{ [м}^3\text{Па/с]}.$$

$$Q_{\text{подст}} = (a \cdot b) \cdot q_{\text{крыш}} \quad (13)$$

где $a_{\text{подст}} = 12 \text{ [м]}$;

$b_{\text{подст}} = 6 \text{ [м]}$;

$$Q_{\text{подст}} = (12 \cdot 6) \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 86,4 \cdot 10^{-8} \text{ [м}^3\text{Па/с]}.$$

$$Q_{\text{экр(нерж)}} = \left(2(ab + bc) + db + \left(ae + \frac{d+e}{2} \cdot f \right) \right) \cdot q_{\text{экр}} \quad (14)$$

где $a_{\text{экр}} = 5,5 \text{ [м]}$;

$b_{\text{экр}} = 11 \text{ [м]}$;

$c_{\text{экр}} = 1,44 \text{ [м]}$;

$d_{\text{экр}} = 2,5 \text{ [м]}$;

$e_{\text{экр}} = 4,5 \text{ [м]}$;

$$f_{\text{экp}}=1 \text{ [M]}.$$

$$Q_{\text{экрaн(Ni)}}=2 \cdot (5,5 \cdot 11 + 1,41 \cdot 11) + (2,5 \cdot 11) + (4,5 \cdot 5,5(4,5 + 2,5) \cdot 1/2)) \cdot 7 \cdot 10^{-6} = \\ = 145425 \cdot 10^{-8} \text{ [M}^3\text{Па/с]}.$$

$$Q_{\text{дншца}} = (\pi \cdot D \cdot L_1) \cdot q_{\text{дншца}} \quad (15)$$

$$Q_{\text{дншца}} = (3,14 \cdot 7,1 \cdot 2,3) \cdot 1,2 \cdot 10^{-8} = 61,53 \cdot 10^{-8} \text{ [M}^3\text{Па/с]}$$

$$Q_{\text{нагр}} = (a \cdot b) \cdot q_{\text{нагр}} \quad (16)$$

где $a_{\text{нагр}}=4,5 \text{ [M]}$;

$b_{\text{нагр}}=11 \text{ [M]}$.

$$Q_{\text{нагр}} = (4,5 \cdot 11) \cdot 6,55 \cdot 10^{-6} = 32422,5 \cdot 10^{-8} \text{ [M}^3\text{Па/с]}.$$

$$Q_{\text{резин упл1}} = \pi \cdot D_2 \cdot h_{n1} \cdot q_{\text{резин.упл}} \quad (17)$$

$$Q_{\text{резин упл1}} = 3,14 \cdot 9,01 \cdot 0,01 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 1414 \cdot 10^{-8} \text{ [M}^3\text{Па/с]}.$$

$$Q_{\text{резин упл2}} = \pi \cdot d_1 \cdot h_{n2} \cdot q_{\text{резин.упл}} \quad (18)$$

$$Q_{\text{резин упл2}} = 3,14 \cdot 0,265 \cdot 0,005 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 20,8 \cdot 10^{-8} \text{ [M}^3\text{Па/с]}.$$

$$Q_{\text{резин упл3}} = 5 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot h_{n2} \cdot q_{\text{резин.упл}} \quad (19)$$

$$Q_{\text{резин упл3}} = 5 \cdot 3,14 \cdot 0,16 \cdot 0,005 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 62,8 \cdot 10^{-8} \text{ [M}^3\text{Па/с]}.$$

$$Q_{\text{резин упл4}} = 2 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot h_{n2} \cdot q_{\text{резин.упл}} \quad (20)$$

$$Q_{\text{резин упл4}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,11 \cdot 0,005 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 17,3 \cdot 10^{-8} \text{ [M}^3\text{Па/с]}.$$

$$Q_{\text{резин.упл5}} = \pi \cdot d_1 \cdot h_{n2} \cdot q_{\text{резин.упл}} \quad (21)$$

$$Q_{\text{резин.упл5}} = 3,14 \cdot 0,515 \cdot 0,005 \cdot 5 \cdot 10^{-5} = 40,4 \cdot 10^{-8} \text{ [м}^3\text{Па/с]}.$$

Величина суммарного потока газа рассчитывается по формуле (1):

$$Q_{\Sigma} = 19,5 \cdot 10^{-4} \text{ [м}^3\text{Па/с]}.$$

2.2 Выбор компоновочной схемы насосов в вакуумной системе

Выберем для проектировочного расчета компоновочную схему насосов в вакуумной системе, которая приведена на рисунке 2. Вакуумная система состоит из насосов сверхвысокого вакуума, насосов высокого вакуума и низковакуумных насосов с запорной арматурой, в качестве откачиваемого объекта берется вакуумная камера.

Исходные данные, необходимые для расчета сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Исходные данные

№ п/п	Параметр	Обозначение	Значение
1	Общий поток газов	$Q, \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$	$19,5 \cdot 10^{-4}$
2	Предельное рабочее давление в вакуумной камере	$P, \text{ Па}$	10^{-8}
3	Диаметр камеры	$d_0, \text{ мм}$	9000
4	Длина камеры	$d_0, \text{ мм}$	15340
5	Длина участка вакуумной системы (ВС) от криогенного насоса до вакуумной камеры (ВК)	$l_1, \text{ мм}$	2000
6	Длина участка ВС от молекулярного насоса до ВК	$l_2, \text{ мм}$	2000
7	Длина участка ВС от диффузионного насоса до молекулярного насоса	$l_3, \text{ мм}$	2000
8	Длина участка ВС от механического насоса до диффузионного насоса	$l_4, \text{ мм}$	2000

Схема компоновки насосов в вакуумной системе откачки показана на рисунке 2.

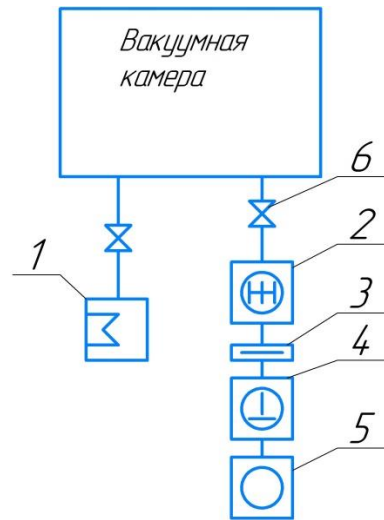


Рисунок 2 – Схема компоновки насосов в вакуумной системе: 1 – криогенный насос, 2 – турбомолекулярный насос, 3 – ловушка, 4 – диффузионный насос, 5 – механический насос, 6 – клапан.

2.3 Выбор вакуумных насосов

2.3.1 Выбор криогенного насоса

В соответствии с условием для сверхвысоковакуумной откачки выберем криогенный насос серии Marathon CP с предельным давлением $P_{pl} = 1,1 \cdot 10^{-9}$ [Па] и диапазоном быстроты действия от $6 \cdot 10^{-3}$ до $1,2$ [$\text{м}^3/\text{с}$].

Удельная быстрота откачки по азоту такого насоса может быть найдена из следующего уравнения:

$$S_{\kappa}^{y\partial} = \frac{D_{\text{эф}} \cdot \beta_p \cdot B \cdot \exp\left[\frac{Q_a}{R \cdot \bar{T}_a}\right]}{k_3 R_3^2} m_a, \quad (22)$$

где $D_{\text{эф}} = 2 \cdot 10^{-12}$ [$\text{м}^2/\text{с}$] – эффективный коэффициент диффузий;

$\beta_p = 0,269$ – коэффициент регенираций;

$B = 0,0005$ [$\text{м}^3/\text{кг}$] – эмпирическая константа;

$k_3 = 1/15$ – коэффициент формы зерна;

$R_3 = 1 \cdot 10^{-12}$ [м] – характерный размер зерна;

$m_a = 1,625$ [кг] – масса адсорбента.

Среднюю температуру газа при адсорбции можно найти из следующего выражения:

$$\bar{T}_a = \frac{1}{2}(T_k + T_э), \quad (23)$$

где T_k – температура криопанели;

$T_э$ – температура теплозащитного экрана.

$$\bar{T}_a = \frac{1}{2}(72 + 373) = 222,5 \text{ [K]},$$

$$S_{\kappa}^{y\delta} = \frac{2 \cdot 10^{-12} \cdot 0,269 \cdot 0,0005 \cdot \exp\left[\frac{12560}{(8,31 \cdot 222,5)}\right]}{1/15(1 \cdot 10^{-3})^2} \cdot 1,625 =$$

$$= 13,35 \text{ [м}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{с}].$$

Быстрота действия криогенного насоса может быть найдена по следующей формуле:

$$S_H = S_{\kappa}^{y\delta} \cdot K_u, \quad (24)$$

где $K_u = 0,4$ – коэффициент использования насоса.

$$S_H = 13,35 \cdot 0,4 = 5,34 \text{ [м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})].$$

Выбираем ближайший по скорости откачки криогенный насос Marathon CP-16, имеющий следующие характеристики:

- быстрота действия: $S_H = 5,8 \text{ [м}^3/\text{с}];$
- диаметр входного патрубка: $d_{вх} = 0,4 \text{ [м]};$
- необходимое давление для запуска насоса: $P_{н\deltaз} = 10^{-1} \text{ [Па]};$
- максимальное создаваемое разряжение: $P_{np} = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ [Па]}.$

2.3.2 Выбор турбомолекулярного насоса

В соответствии с условием для высоковакуумной откачки выбираем турбомолекулярный насос с максимальным создаваемым разрежением $P_{pl} = 10^{-7}$ [Па] и быстротой действия 6,3 [м³/с].

Найдем коэффициент использования турбомолекулярного насоса.

Пользуясь графиком зависимости $K_u = f(S_{эф})$ рисунок 1.3, при $n = 3$ находим для $S_{эф} = 6,3$ [м³/с] оптимальное значение коэффициента использования $K_{uI} = 0,25$.

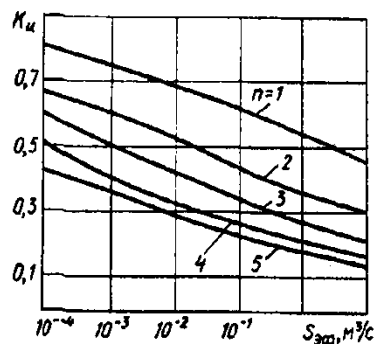


Рисунок 3 – График зависимости $K_u = f(S_{эф})$

Наиболее подходящим по скорости действия и предельному давлению является турбомолекулярный насос ТМН-5000, имеющий следующие технические характеристики:

- номинальная скорость откачки: $S_H = 6,3$ [м³/с];
- диаметр входного патрубка: $d_{вх} = 500$ [мм];
- диаметр выходного патрубка: $d_{вх} = 100$ [мм];
- необходимое давление для запуска: $P_{ндз} = 1$ [Па];
- максимальное создаваемое разрежение: $P_{пр} = 10^{-7}$ [Па].

2.3.3 Выбор двухроторного диффузионного насоса

В соответствии с дополнительными условиями выбираем серию двухроторных насосов типа ДВН.

Рабочее давление двухроторного насоса выбирается по необходимому давлению для запуска турбомолекулярного насоса с коэффициентом запаса $\varphi = 2$.

Тогда получим следующее выражение:

$$p_2 = P_{\text{наиб}}/\varphi = 1/2 = 0,5 \text{ [Па]}. \quad (25)$$

Что соответствует эффективной быстрой действия:

$$S_{\text{эф}2} = \frac{Q_{\Sigma}}{p_2} = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{0,5} = 0,39 \cdot 10^{-2} \text{ [м}^3/\text{с]}. \quad (26)$$

По графику $K_u = f(S_{\text{эф}})$ на рисунке 4, при $n = 5$ и $S_{\text{эф}} = 0,39 \cdot 10^{-2} \text{ [м}^3/\text{с]}$ находим оптимальное значение коэффициента использования двухроторного насоса $K_{u2} = 0,91$.

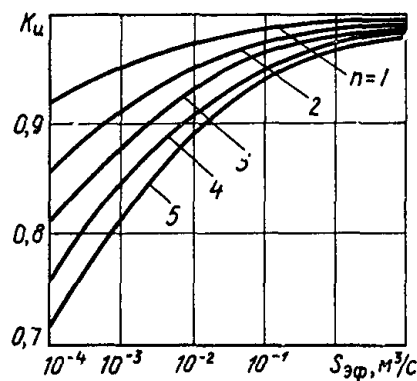


Рисунок 4 – График зависимости $K_u = f(S_{\text{эф}})$

Номинальная быстрая откачки двухроторного диффузионного насоса находится из следующей формулы:

$$S_{\text{м}2} = \frac{Q_{\Sigma}}{k_{u2} p_2 - p_{\text{нр}2}} = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{0,91 \cdot 0,5 - 7 \cdot 10^{-2}} = 5,08 \cdot 10^{-3} \text{ [м}^3/\text{с]}. \quad (27)$$

Ближайшим по быстрой откачки является двухроторный диффузионный насос 2ДВН-1500, имеющий следующие технические характеристики:

– номинальная быстрая откачки: $S_H = 1,5 \text{ [м}^3/\text{с]}$;

- диаметр входного патрубка: $d_{вх} = 250$ [мм];
- необходимое давление для запуска насоса: $P_{наиб} = 10^2$ [Па];
- максимальное создаваемое разрежение: $P_{пр} = 7 \cdot 10^{-2}$ [Па].

2.3.4 Выбор механического золотникового насоса

В соответствии с условием выбираем серию механических золотниковых насосов типа НВЗ.

Рабочее давление для механического золотникового насоса определяется по максимальному давлению в выпускном патрубке двухстороннего насоса с коэффициентом запаса $\varphi = 2$.

Тогда получаем выражение:

$$P_3 = P_{наиб} / \varphi = 100 / 2 = 50 \text{ [Па]}. \quad (28)$$

Отсюда эффективная быстрота действия золотникового насоса равна:

$$S_{эфз} = \frac{Q_{\Sigma}}{p_3} = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{50} = 0,39 \cdot 10^{-4} \text{ [м}^3 / \text{с]}. \quad (29)$$

По рисунку 5 находим оптимальное значение коэффициента использования при $n=3$ и $S_{эфз} = 0,39 \cdot 10^{-4}$ [м³/с] $K_{u3} = 0,8$.

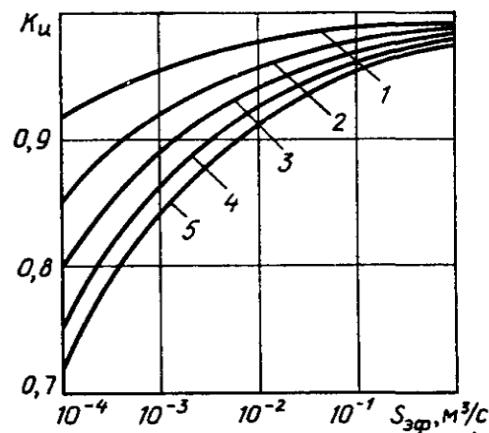


Рисунок 5 – График зависимости $K_u = f(S_{эфз})$

Номинальная быстрота откачки механического золотникового насоса находится по формуле:

$$S_{м3} = \frac{Q_{\Sigma}}{k_{уз} p_3 - p_{нр3}} = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{0,8 \cdot 50 - 1} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ [м}^3 \text{ / с]}. \quad (30)$$

Наиболее подходящий по быстроте откачки и давлению является механический золотниковый насос НВЗ-500, имеющий следующие технические характеристики:

- номинальная быстрота откачки: $S_H=0,5$ [м³/с];
- диаметр входного патрубка: $d_{вх}=160$ [мм];
- максимальное создаваемое разрежение: $P_{нр}=1$ [Па];
- наибольшее давление: $P_{наиб.}=10^5$ [Па].

2.4 Определение размеров трубопроводов и выбор вакуумной арматуры

2.4.1 Сверхвысоковакуумная система

Сначала необходимо найти проводимость сверхвысоковакуумного участка системы откачки от криогенного насоса до вакуумной камеры по следующей формуле:

$$U_{01} = S_{H1} \frac{K_{u1}}{1 - K_{u1}}, \quad (31)$$

где S_{H1} – быстрота откачки насоса.

$$U_{01} = 5,8 \frac{0,4}{1 - 0,4} = 3,12 \text{ [м}^3 \text{ / с]}.$$

Составляем схему компоновки сверхвысоковакуумного участка системы откачки. Она представлена на рисунке б.

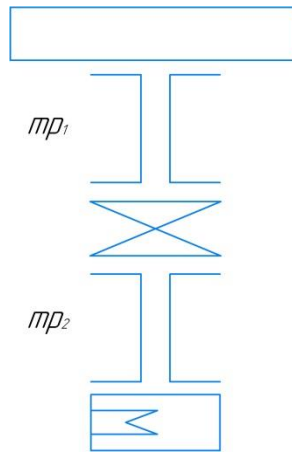


Рисунок 6 – Компонировочная схема криоадсорбционной откачки

Определяем проводимости и диаметры трубопроводов и арматуры. Сначала будем считать, что все элементы выбранного участка имеют одинаковую проводимость:

$$U_{ij} = 3U_{0i}, \quad (32)$$

$$U_{11} = 3 \cdot 3,12 = 7,44 \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

Режим течения на участке трубопровода определяется по рабочему давлению $p_1 = 2 \cdot 10^{-4}$ [Па] и диаметру вх. патрубка насоса $d_{ex} = 0,4$ [м].

Можно использовать выражения:

$$\bar{p}d > 1,33 \text{ - режим вязкостный;}$$

$$\bar{p}d < 0,02 \text{ - режим молекулярный,}$$

где \bar{p} – среднее давление, [Па];

d – диаметр условного прохода, [м].

$$\bar{P}_m = \frac{0,02}{0,4} = 0,05 \text{ [Па];}$$

$$\bar{P}_B = \frac{1,33}{0,4} = 3,33 \text{ [Па].}$$

Режим течения молекулярный.

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

$$\frac{1}{U_{11}} = \frac{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}}{91d_1^2} + \frac{l_1}{121d_1^3}, \quad (33)$$

где d_1 – диаметр текущего/рассматриваемого элемента;

d_0 – диаметр предыдущего элемента;

l_1 – длина текущего/рассматриваемого элемента.

Подставив общую проводимость участка и преобразовывая, получим выражение:

$$d_1^3 - 0,024d_1 - 0,049 = 0. \quad (34)$$

Корни уравнения определяются аналитически, затем уточняются методом касательных и заносится в таблицу 2:

$$f(d) = d_1^3 - 0,024d_1 - 0,049, \quad (35)$$

$$f'(d) = 3d_1^2 - 0,024. \quad (36)$$

Таблица 2 – Значения $d=f(d)$

D	0	0,01	0,4
F	-	-	+

$$d_0 = 0,4;$$

$$d_1 = 0,4 - \frac{f(0,4)}{f'(0,4)} = 0,4 - \frac{0,0014}{0,456} = 0,3969. \quad (37)$$

Выбираем диаметр трубопровода соответствующий входному диаметру патрубка насоса $d_l = 400$ [мм]. Зная диаметр, можно рассчитать проводимость первого участка по формуле (33). Она будет равна:

$$\frac{1}{U_{11}} = \frac{1 - \frac{0,4^2}{9^2}}{91 \cdot 0,4^2} + \frac{2}{121 \cdot 0,4^3} = 0,327.$$

Проводимость участка $U_{11} = 3,1$ [м³/с].

Поскольку при последовательном соединении элементов магистрали с различными диаметрами в местах, где находятся сужения проходного сечения, будут возникать дополнительные сопротивления, поэтому необходимо найти проводимость этих сужений для молекулярного режима течения газа. Проводимость отверстия равна:

$$U_{отв1} = 116 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 116 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{4} = 14,57 \text{ [м}^3 / \text{с]}. \quad (38)$$

Проводимость трубопровода рассчитывается в соответствии со следующей формулой и равна:

$$U_{трл} = 121 \frac{d^3}{l} = 121 \frac{0,4^3}{2} = 3,87 \text{ [м}^3 / \text{с]}. \quad (39)$$

Выбираем затвора ЗВЭ-400. Диаметр проходного сечения данного затвора равен $d_y = 400$ [мм], при этом его проводимость равна $U_y = 46,25$ [м³/с]. Тогда проводимость второго элемента магистрали находится из формулы:

$$\frac{1}{U_{12}} = \frac{1 - \frac{d_y^2}{d_1^2}}{91 d_y^2} + \frac{1}{46,25} = \frac{1 - \frac{0,4^2}{0,4^2}}{91 \cdot 0,4^2} + \frac{1}{46,25} = 0,0216. \quad (40)$$

Откуда проводимость второго элемента равна $U_{12} = 46,29$ [м³/с].

Так как $d_1 < d_v$, то дополнительного сопротивления потоку не будет.

Поскольку третий участок по размерам совпадает с первым участком, то и их проводимости будут равны $U_{13}=U_{11}=3,1$ [м³/с], $d_3=0,4$ [м].

Так как $d_v > d_3$, следовательно, находим проводимость отверстия для молекулярного режима течения газа по формуле (38). Она равна:

$$U_{отв3} = 116 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,4^2}{4} = 14,57 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Проводимость трубопровода на третьем участке находится по формуле (39) и равна:

$$U_{трм3} = 121 \frac{0,4^3}{2} = 3,87 \text{ [м}^3 / \text{с]}.$$

Результативная проводимость магистрали от криогенного насоса до места стыка трубопровода с вакуумной камерой находится по следующей формуле:

$$U_{общ} = \frac{1}{\frac{1}{U_{отв1}} + \frac{1}{U_{трп1}} + \frac{1}{U_{12}} + \frac{1}{U_{отв3}} + \frac{1}{U_{трп3}}}, \quad (41)$$

$$U_{общ} = \frac{1}{\frac{1}{14,57} + \frac{1}{3,87} + \frac{1}{46,29} + \frac{1}{14,57} + \frac{1}{3,87}} = 2,79 \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

Общая проводимость сверхвысоковакуумного участка равна $U_{общ}=2,79$ [м³/с], что больше теоретического значения $U_{01}=2,48$ [м³/с].

Коэффициент использования насоса определяется следующим образом:

$$K_{u1} = \frac{U_{общ}}{U_{общ} - S_{H1}}, \quad (42)$$

$$K_{u1} = \frac{2,79}{2,79 - 5,8} = 0,32.$$

Коэффициент использования магистрали равен $K_{ul}=0,32$, что на немного больше коэффициента использования, определенного теоретическим путем $K_u=0,3$.

Определим распределения давлений по длине магистралей сверхвысоковакуумной системы от насоса до вакуумной камеры и в критических сечениях. Рассчитывать будем по следующим зависимостям:

$$p_{Hi} = p_{npi} + Q / S_{mi}, \quad (43)$$

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

Повышение давления на последующих элементах i -го элемента магистрали вакуумной системы определяем по потоку газа Q и проводимости k -го элемента U_{ki} :

$$\Delta p_{ki} = Q / U_{ki}, \quad (44)$$

В местах, где диаметры трубопроводов не совпадают, наблюдаются скачки давления:

$$\Delta p_j = Q / U_{0j}, \quad (45)$$

где U_{0j} – проводимость j -го сечения.

Давления в критических сечениях между элементами магистрали вакуумной системы рассчитывается следующим образом:

$$p_{ki} = p_{npi} + Q / S_{mi} + Q / U_{ki}. \quad (46)$$

По формуле (43) рассчитывается давление P_{H1} :

$$P_{H1} = 1,1 \cdot 10^{-9} + \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{5,8} = 3,36 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]}.$$

Перепад давлений и давление в начальном сечении элемента определяются по формулам (45), (46):

$$\Delta P_3 = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{3,87} = 5,04 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$P_3 = 3,36 \cdot 10^{-6} + 5,04 \cdot 10^{-5} = 8,4 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_{OTB3} = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{14,57} = 1,34 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$P_{OTB3} = 8,4 \cdot 10^{-4} + 1,34 \cdot 10^{-4} = 9,74 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_{ЗВЭ} = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{46,29} = 0,42 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$P_{ЗВЭ} = 9,74 \cdot 10^{-5} + 0,42 \cdot 10^{-5} = 10,16 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_1 = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{3,87} = 5,04 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$P_1 = 10,16 \cdot 10^{-4} + 5,04 \cdot 10^{-4} = 15,2 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_{OTB1} = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{14,57} = 1,34 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$P_{OTB1} = 15,2 \cdot 10^{-4} + 1,34 \cdot 10^{-4} = 16,54 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]}.$$

Результаты вычислений сведены в следующую таблицу.

Таблица 3 – Распределение давления по магистрали вакуумной системы откачки от криогенного насоса до камеры

Название элемента	Проводимость элемента U , м ³ /с	Перепад давления на элементе, ΔP , Па	P на входе в элемент, Па	P на выходе из элемента, Па
Трубопровод 2	3,87	$5,04 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$	$3,36 \cdot 10^{-4}$
Отверстие 2	14,57	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$9,74 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$
ЗВЭ	46,29	$0,42 \cdot 10^{-4}$	$10,16 \cdot 10^{-4}$	$9,74 \cdot 10^{-4}$
Трубопровод 1	3,87	$5,04 \cdot 10^{-4}$	$15,2 \cdot 10^{-4}$	$10,16 \cdot 10^{-4}$
Отверстие 1	14,57	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$16,54 \cdot 10^{-4}$	$15,2 \cdot 10^{-4}$

2.4.2 Высоковакуумная система

Сначала необходимо найти проводимость высоковакуумного участка системы откачки от турбомолекулярного насоса до вакуумной камеры по следующей формуле:

$$U_{01} = 6,3 \frac{0,25}{1 - 0,25} = 2,1 \text{ [м}^3 \text{ / с]}.$$

Определяем проводимости и диаметры трубопроводов и арматуры. Сначала, для упрощения расчета, будем считать, что все элементы выбранного участка имеют одинаковую проводимость:

Тогда проводимость участка, рассчитанная по формуле (32) будет равна:

$$U_{II} = 3 \cdot 2,1 = 6,3 \text{ [м}^3 \text{ / с]}.$$

Режим течения газа определяем, используя критерий Кнудсена. Для этого используем рабочее давление $p_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ [Па] и диаметр входного патрубка насоса $d_{вх} = 0,5$ [м].

Критерий Кнудсена равен:

$$Kn = \frac{L}{d_{эф}} = \frac{L_1}{p_1 \cdot d_{вх}}, \quad (47)$$

$$Kn = \frac{2}{1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5} = 400 > 1,5 \text{ – следовательно режим течения молекуляр-}$$

ный.

Составим схему компоновки участка вакуумной системы от турбомолекулярного насоса до камеры. Она приведена на рисунке 7.

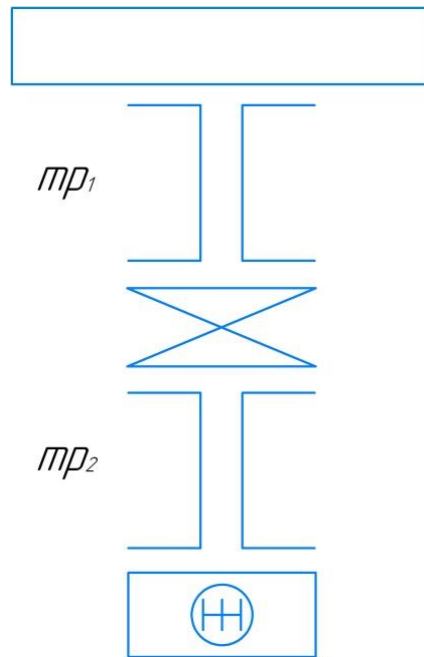


Рисунок 7 – Компонентная схема откачки турбомолекулярным насосом

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

$$\frac{1}{U_{11}} = \frac{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}}{91d_1^2} + \frac{l_1}{121d_1^3}, \quad (48)$$

где d_1 – диаметр рассматриваемого элемента;

d_0 – диаметр предыдущего элемента;

l_1 – длина рассматриваемого элемента.

Подставив общую проводимость участка, получим выражение:

$$\frac{1}{6,3} = \frac{1 - \frac{d_1^2}{9^2}}{91d_1^2} + \frac{2}{121d_1^3}. \quad (49)$$

Путем несложных преобразований получаем уравнение:

$$d_I^3 - 0,069d_I - 0,1 = 0. \quad (50)$$

Корни уравнения определяются аналитически, затем уточняются методом касательных и заносятся в таблицу 4:

$$f(d) = d_I^3 - 0,069d_I - 0,1; \quad (51)$$

$$f'(d) = 3d_I^2 - 0,069. \quad (52)$$

Таблица 4 – Значения $d=f(d)$

d	0	0,3	0,6
f	-	-	+

$$d_0 = 0,6;$$

$$d_1 = 0,6 - \frac{f(0,6)}{f'(0,6)} = 0,6 - \frac{0,0746}{1,01} = 0,53; \quad (53)$$

$$d_2 = 0,53 - \frac{f(0,53)}{f'(0,53)} = 0,53 - \frac{0,0123}{0,7737} = 0,51; \quad (54)$$

$$d_I \approx 0,6 \text{ [м]}.$$

Выбираем ближайший диаметр трубопровода равный $d_I = 630$ [мм]. Исходя из диаметра и длины участка магистрали, проводимость рассчитывается по формуле (48):

$$\frac{1}{U_{11}} = \frac{1 - \frac{0,63^2}{9^2}}{91 \cdot 0,63^2} + \frac{2}{121 \cdot 0,63^3} = 0,069.$$

$$\text{Отсюда проводимость } U_{11} = 14,49 \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

Поскольку при последовательном соединении элементов магистрали с различными диаметрами в местах, где находятся сужения проходного сечения, будут возникать дополнительные сопротивления, поэтому необходимо найти

проводимость этих сужений для молекулярного режима течения газа. Проводимость отверстия рассчитываемая по формуле (38) равна:

$$U_{отвм1} = 116 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,63^2}{4} = 36,1 \text{ [м}^3 \text{ / с]}.$$

Проводимость трубопровода, рассчитываемая по выражению (39), равна:

$$U_{трм1} = 121 \frac{0,63^3}{2} = 15,1 \text{ [м}^3 \text{ / с]}.$$

Проводимость трубопровода $U_{трм1}=15,1 \text{ [м}^3\text{/с]}$.

Выбираем затвор ЗВЭ-630. Диаметр проходного сечения данного затвора равен $d_y=630 \text{ [мм]}$, при этом его проводимость равна $U_y = 146 \text{ [м}^3\text{/с]}$. Тогда проводимость второго элемента магистрали находится из формулы:

$$\frac{1}{U_{12}} = \frac{1 - \frac{d_y^2}{d_1^2}}{91d_y^2} + \frac{1}{146} = \frac{1 - \frac{0,63^2}{0,63^2}}{91 \cdot 0,63^2} + \frac{1}{146} = 0,0068. \quad (55)$$

Выражая, проводимость будет равна $U_{12}=146 \text{ [м}^3\text{/с]}$.

Поскольку третий и первый участок идентичны, то и их проводимости будут равны $U_{13}=U_{11}=14,49 \text{ [м}^3\text{/с]}$, $d_3=0,63 \text{ [м]}$.

Проводимость отверстия, рассчитываемая по формуле (38), равна:

$$U_{отвм3} = 116 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,63^2}{4} = 36,1 \text{ [м}^3 \text{ / с]}.$$

Проводимость на третьем участке магистрали находится по формуле (39) и равна:

$$U_{трм3} = 121 \frac{0,63^3}{2} = 15,1 \text{ [м}^3 \text{ / с]}.$$

Результативная проводимость магистрали от турбомолекулярного насоса до места стыка трубопровода с вакуумной камерой находится по следующей формуле:

$$U_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{U_{11}} + \frac{1}{U_{12}} + \frac{1}{U_{13}}} = \frac{1}{\frac{1}{14,49} + \frac{1}{146} + \frac{1}{14,49}} = 6,9 \text{ [м}^3/\text{с]}. \quad (56)$$

Общая проводимость магистрали высоковакуумной системы 6,9 [м³/с], что больше теоретического значения 2,1 [м³/с] ($U_{\text{общ}} > U_{01}$).

Определим коэффициент использования насоса по формуле (42):

$$K_{u1} = \frac{6,9}{6,9 - 6,3} = 0,52.$$

Коэффициент использования магистрали равен $K_{u1}=0,52$, что больше коэффициента использования, найденного теоретически $K_u=0,25$.

Определим распределения давлений по длине магистралей высоковакуумной системы от насоса до вакуумной камеры и в критических сечениях. Рассчитывать будем по уже известным зависимостям.

Давление P_{H1} по формуле (43) равно:

$$P_{H1} = 10^{-7} + \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{6,3} = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]}.$$

Перепад давлений и давление в начальном сечении элемента определяются по формулам (45), (46):

$$\Delta P_3 = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{15,1} = 1,29 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$P_3 = 3,1 \cdot 10^{-4} + 1,29 \cdot 10^{-4} = 4,39 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_{\text{отв3}} = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{36,1} = 0,54 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$P_{\text{отв3}} = 4,39 \cdot 10^{-4} + 0,54 \cdot 10^{-4} = 4,93 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_{\text{звэ}} = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{146} = 0,134 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$P_{\text{звэ}} = 4,93 \cdot 10^{-4} + 0,134 \cdot 10^{-4} = 5,06 \cdot 10^{-4} \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_1 = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{15,1} = 1,29 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$P_1 = 5,06 \cdot 10^{-4} + 1,29 \cdot 10^{-4} = 6,35 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$\Delta P_{OTB1} = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{36,1} = 0,54 \cdot 10^{-4} \text{ [Па];}$$

$$P_{OTB1} = 6,35 \cdot 10^{-4} + 0,54 \cdot 10^{-4} = 6,89 \cdot 10^{-4} \text{ [Па].}$$

Результаты вычислений приведены в следующей таблице.

Таблица 5 – Распределение давления на участке вакуумной системы от турбомолекулярного насоса до откачиваемого объекта

Название элемента	Проводимость элемента U , $\text{м}^3/\text{с}$	Перепад давления на элементе ΔP , Па	Давление на входе в элемент, Па	Давление на выходе из элемента, Па
Трубопровод 3	15,1	$1,29 \cdot 10^{-4}$	$4,39 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$
Отверстие 3	36,1	$0,54 \cdot 10^{-4}$	$4,93 \cdot 10^{-4}$	$4,39 \cdot 10^{-4}$
ЗВЭ	146	$0,134 \cdot 10^{-4}$	$5,06 \cdot 10^{-4}$	$4,93 \cdot 10^{-4}$
Трубопровод 1	15,1	$1,29 \cdot 10^{-4}$	$6,35 \cdot 10^{-4}$	$5,06 \cdot 10^{-4}$
Отверстие 1	36,1	$0,54 \cdot 10^{-4}$	$6,89 \cdot 10^{-4}$	$6,35 \cdot 10^{-4}$

2.4.3 Область среднего вакуума

Сначала необходимо найти проводимость области среднего вакуума системы откачки от двухроторного диффузионного насоса до вакуумной камеры по следующей формуле:

$$U_{02} = 1,5 \cdot \frac{0,91}{1 - 0,91} = 15,2 \text{ [м}^3/\text{с].}$$

Определяем проводимости и диаметры трубопроводов и арматуры. Сначала, для упрощения расчета, будем считать, что все элементы выбранного участка имеют одинаковую проводимость:

Тогда проводимость участка рассчитанная по формуле (32) будет равна:

$$U_{ij} = 5 \cdot U_{02} = 5 \cdot 15,2 = 75,8 \text{ [м}^3/\text{с].}$$

Режим течения газа определяем, используя критерий Кнудсена. Для этого используем рабочее давление $p_1 = 2 \cdot 10^1$ [Па] и диаметр входного патрубка насоса $d_{вх} = 0,25$ [м].

Критерий Кнудсена определяется по формуле (47):

$$Kn = \frac{2}{4 \cdot 10^0 \cdot 0,25} = 2 > 1,5 \text{ – следовательно режим течения газа молекулярный.}$$

лярный.

Составим схему компоновки данной магистрали вакуумной системы. Она представлена на следующем рисунке 8.

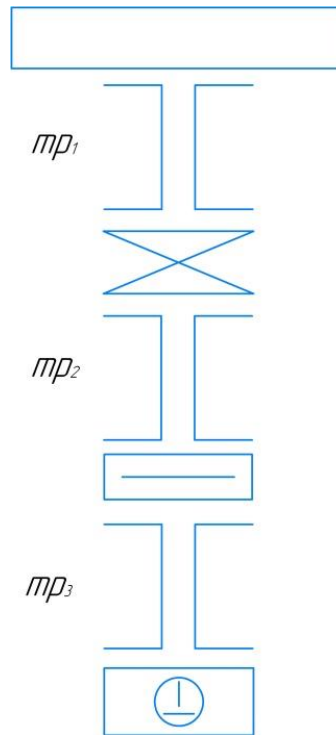


Рисунок 8 – Компоновочная схема откачки диффузионным насосом

Диаметр трубопровода может быть рассчитан из условия последовательного соединения входного отверстия и трубопровода по формуле (48):

Подставив общую проводимость участка, получим выражение:

$$\frac{1}{75,8} = \frac{1 - \frac{d_1^2}{0,1^2}}{91d_1^2} + \frac{2}{121d_1^3}. \quad (57)$$

Преобразуя получим:

$$d_1^3 - 0,009d_1 - 0,015 = 0. \quad (58)$$

Найдем корни аналитически, затем уточним их методом касательных и занесем в таблицу 6:

$$f(d) = d_1^3 - 0,009d_1 - 0,015; \quad (59)$$

$$f'(d) = 3d_1^2 - 0,009. \quad (60)$$

Таблица 6 – Значения $d = f(d)$

d	0	0,15	0,26
f	-	-	+

$$d_0 = 0,26;$$

$$d_1 = 0,26 - \frac{f(0,26)}{f'(0,26)} = 0,26 - \frac{0,000236}{0,0586} = 0,256; \quad (61)$$

$$d_1 \approx 0,26 \text{ [м]}.$$

Диаметр проходного сечения участка магистрали $d_1 = 0,32 \text{ [м]}$.

Тогда проводимость первого участка, рассчитываемая по формуле (48), равна:

$$\frac{1}{U_{21}} = \frac{1 - \frac{0,32^2}{9^2}}{91 \cdot 0,32^2} + \frac{2}{121 \cdot 0,32^3} = 0,269. \quad (62)$$

Отсюда, выражая проводимость можно получить ее значение равное $U_{21} = 3,7 \text{ [м}^3/\text{с]}$.

Поскольку при последовательном соединении элементов магистрали с различными диаметрами в местах, где находятся сужения проходного сечения, будут возникать дополнительные сопротивления, поэтому необходимо найти

проводимость этих сужений для молекулярного режима течения газа. Проводимость отверстия рассчитываемая по формуле (38) равна:

$$U_{отвм1} = 116 \cdot \frac{3.14 \cdot 0,32^2}{4} = 9,3 \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

Проводимость участка магистрали по формуле (39) равна:

$$U_{трм1} = 121 \frac{0,32^3}{2} = 1,9 \text{ [м}^3 / \text{с]}.$$

Выбираем затвор ЗВЭ-400. Диаметр проходного сечения данного затвора равен $d_y=400$ [мм], при этом его проводимость равна $U_y = 46,25$ [м³/с]. Тогда проводимость второго элемента магистрали находится из формулы:

$$\frac{1}{U_{22}} = \frac{1 - \frac{d_v^2}{d_1^2}}{91d_v^2} + \frac{1}{46,25} = 0,06. \quad (63)$$

Таким образом, проводимость участка $U_{22} = 16,59$ [м³/с].

Диаметр третьего участка магистрали равен:

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{l \cdot U_{23}}{121}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 0,108}{121}} = 0,121 \text{ [м]}. \quad (64)$$

Ближайший диаметр сечения трубопровода равен $d_l = 0,125$ [м]. Тогда проводимость третьего участка магистрали, рассчитываемая по (48), равна:

$$\frac{1}{U_{23}} = 6,9.$$

Выражая, получим значение проводимости на третьем участке магистрали $U_{23} = 0,14$ [м³/с].

Проводимость на третьем участке магистрали находится по формуле (39) и равна:

$$U_{трмз} = 121 \frac{0,125^3}{2} = 0,12 \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

Выбираем азотную ловушку из серии ЛАФ, которая имеет диаметр сечения $d_y = 0,160 \text{ [м]}$ и проводимость $U_{24} = 0,2 \text{ [м}^2/\text{с]}$.

Поскольку третий и пятый участок идентичны, то и их проводимости будут равны $U_{25} = U_{23} = 0,14 \text{ [м}^3/\text{с]}$, $d_5 = 0,125 \text{ [м]}$.

Результативная проводимость магистрали от двухроторного насоса до места стыка трубопровода с вакуумной камерой находится по следующей формуле:

$$U_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{U_{21}} + \frac{1}{U_{22}} + \frac{1}{U_{23}} + \frac{1}{U_{24}} + \frac{1}{U_{25}}}, \quad (65)$$

$$U_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{3,7} + \frac{1}{16,59} + \frac{1}{0,14} + \frac{1}{0,2} + \frac{1}{0,14}} = 0,05 \text{ [м}^3 / \text{с]}.$$

Общая проводимость участка системы откачки диффузионным двухроторным насосом равна $U_{\text{общ}} = 0,05 \text{ [м}^3/\text{с]}$. Которая несколько больше требуемой $U_{02} = 0,024 \text{ [м}^3/\text{с]}$.

Определим коэффициент использования двухроторного диффузионного насоса находится по формуле (42) и равен:

$$K_{u1} = \frac{0,05}{0,05 - 0,00508} = 0,9.$$

Определим распределения давлений по длине магистралей системы среднего вакуума от насоса до вакуумной камеры и в критических сечениях. Рассчитывать будем по уже известным зависимостям.

Давление на входном сечении насоса рассчитывается согласно формуле (43):

$$p_{H2} = 7 \cdot 10^{-2} + \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{0,00508} = 0,453 \text{ [Па]}.$$

Перепад давления на элементах и давление на входе в элемент рассчитываются по зависимостям (45), (46):

$$\Delta P_5 = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{0,14} = 0,014 \text{ [Па]};$$

$$P_5 = 0,453 + 0,014 = 0,467 \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_{\text{лов}} = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{0,2} = 0,009 \text{ [Па]};$$

$$P_{\text{лов}} = 0,467 + 0,009 = 0,476 \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_3 = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{0,14} = 0,014 \text{ [Па]};$$

$$P_3 = 0,476 + 0,014 = 0,489 \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_B = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{46,25} = 0,00004 \text{ [Па]};$$

$$P_B = 0,489 + 0,00004 = 0,48904 \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_1 = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{3,7} = 0,0005 \text{ [Па]};$$

$$P_1 = 0,48904 + 0,0005 = 0,48954 \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_{\text{отв1}} = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{9,3} = 0,0002 \text{ [Па]};$$

$$P_{\text{отв1}} = 0,48954 + 0,0002 = 0,48975 \text{ [Па]}.$$

Полученные результаты приведены в следующей таблице.

Таблица 7 – Распределение давления на участке вакуумной системы от двухроторного насоса до откачиваемого объекта

Название элемента	Проводимость элемента U, м ³ /с	Перепад давления на элементе, ΔP, Па	Давление на входе в элемент, Па	Давление на выходе из элемента, Па
Трубопровод 5	0,14	0,01400	0,46700	0,4530
Ловушка 4	0,20	0,00900	0,47600	0,4670
Трубопровод 3	0,14	0,01400	0,48900	0,4760
ЗВЭ 2	46,25	0,00004	0,48904	0,4890
Трубопровод 1	3,70	0,00050	0,48954	0,48904
Отверстие 1	9,30	0,00020	0,48975	0,48954

2.4.4 Область низкого вакуума

Сначала необходимо найти проводимость низковакуумного участка системы откачки от механического золотникового насоса до двухроторного насоса по следующей формуле:

$$U_{03} = 0,5 \cdot 10^{-4} \frac{0,8}{1 - 0,8} = 0,0002 \text{ [м}^3 \text{ / с]}.$$

Определяем проводимости и диаметры трубопроводов и арматуры. Сначала, для упрощения расчета, будем считать, что все элементы выбранного участка имеют одинаковую проводимость:

$$U_{ij} = 3 \cdot 0,0002 = 0,0006 \text{ [м}^3 \text{ / с]}.$$

Режим течения газа определяем, используя критерий Кнудсена. Для этого используем рабочее давление $p_1 = 50$ [Па] и диаметр входного патрубка насоса $d_{вх} = 0,16$ [м].

Критерий Кнудсена находится по формуле (47):

$$Kn = \frac{2}{50 \cdot 0,16} = 0,25 < 1,5 \text{ – следовательно, режим течения молекулярно-}$$

вязкостный.

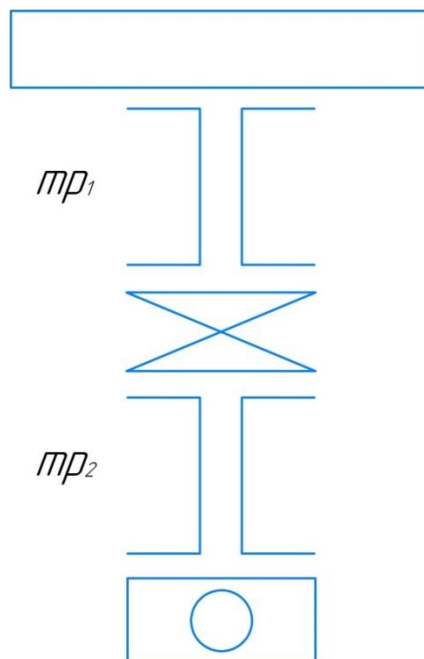


Рисунок 9 – Компоновочная схема откачки механическим золотниковым насосом

Так как режим течения газа в магистрали молекулярно-вязкостный, то сопротивлением от переделов диаметров отверстий пренебрегаем.

Диаметр первого участка магистрали рассчитываем при среднем давлении в трубопроводе $p_{cp} = p_3 = 50$ [Па] по проводимости:

$$U_{ij} = \frac{1,36 \cdot 10^3 \cdot d_i^4}{l_i} p_{cp}. \quad (66)$$

Из уравнения $\frac{1,36 \cdot 10^3 \cdot d_1^4}{2} \cdot 50 = 6$ диаметр первого трубопровода равен $d_1 = 0,095$.

Выбираем $d_1 = 0,1$ [м], что соответствует следующему значению проводимости, которое определяется по формуле (66):

$$U_{31} = \frac{1,36 \cdot 10^3 \cdot 0,1^4}{2} \cdot 50 = 3,4 \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

В качестве клапана на втором участке по выбираем ВРП-100 с диаметром условного прохода $d_y = 100$ [мм] и проводимостью $U_{32} = 0,332$ [м³/с].

Диаметр третьего трубопровода рассчитывается аналогично первому:

$$\frac{1,36 \cdot 10^3 \cdot d_3^4}{3} \cdot 50 = 6;$$

$$d_3 = 0,095 \text{ [м]}.$$

Диаметр третьего трубопровода $d_3 = 0,095$ [м].

Выбираем $d_3 = 0,1$ [м], что соответствует следующему значению проводимости:

$$U_{33} = \frac{1,36 \cdot 10^3 \cdot 0,1^4}{2} \cdot 50 = 3,4 \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

Общая проводимость находится из следующего выражения:

$$U_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{U_{31}} + \frac{1}{U_{32}} + \frac{1}{U_{33}}} = \frac{1}{\frac{1}{3,4} + \frac{1}{0,332} + \frac{1}{3,4}} = 0,28 \text{ [м}^3/\text{с]}. \quad (67)$$

Общая проводимость участка магистрали подключенного к механическому золотниковому насосу вакуумной системы равна $U_{\text{общ}}=0,28 \text{ [м}^3/\text{с]}$, что несколько больше требуемой $U_{03}=0,0002 \text{ [м}^3/\text{с]}$.

Коэффициент использования находится по формуле (42):

$$K_{\text{и1}} = \frac{0,28}{0,28 - 0,5 \cdot 10^{-4}} = 0,89.$$

Коэффициент использования, полученный практическим путем $K_{\text{и3}}=0,89$, больше оптимального значения коэффициента использования $K_{\text{и3}} = 0,8$.

Определим распределения давлений по длине магистралей системы низкого вакуума от золотникового насоса до двухроторного и в критических сечениях. Рассчитывать будем по уже известным зависимостям.

Давление в начальном сечении насоса находится по формуле (43):

$$P_{\text{НЗ}} = 1 + \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{0,5 \cdot 10^{-4}} = 40 \text{ [Па]}.$$

Перепад давления на элементах и давление на входе в элемент рассчитываются по зависимостям (45), (46):

$$\Delta P_3 = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{3,4} = 0,0005 \text{ [Па]};$$

$$P_3 = 40 + 0,005 = 40,0005 \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_{\text{КМВ}} = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{0,332} = 0,006 \text{ [Па]};$$

$$P_{\text{КМВ}} = 40,0005 + 0,005 = 40,0055 \text{ [Па]};$$

$$\Delta P_1 = \frac{19,5 \cdot 10^{-4}}{3,4} = 0,0005 \text{ [Па]};$$

$$P_1 = 40,0055 + 0,0005 = 40,006 \text{ [Па]}.$$

Результаты вычислений приведены в таблице ниже.

Таблица 8 – Распределение давления на участке вакуумной системы от золотникового насоса до двухроторного насоса

Название элемента	Проводимость элемента U , $\text{м}^3/\text{с}$	Перепад давления на элементах, ΔP , Па	Давление на входе в элемент, Па	Давление на выходе из элемента, Па
Трубопровод 3	3,400	0,0005	40,0005	40
КМУ	0,332	0,0060	40,0055	40,0005
Трубопровод 1	3,400	0,0005	40,0060	40,0055

Проверим, соответствуют ли форвакуумные насосы необходимым требованиям для откачки газа из рабочей камеры, имеющей объем $V = 1000 \text{ [м}^3\text{]}$, за время $t = 200 \text{ [мин]}$. Предварительная откачка продолжается до давления 1 [Па] .

Для механических насосов $\nu = 1,1 \div 1,25$, тогда:

$$S_0 = \frac{S_n}{\nu}, \quad (68)$$

$$S_0 = \frac{0,5}{1,1} = 0,45 \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

Время предварительной откачки определяется следующей формулой:

$$t = \frac{V}{S_0} \cdot \ln \left(\frac{p_{нач} - Q_{\Sigma} / S_0}{p - Q_{\Sigma} / S_0} \right) \cdot \frac{1}{2}, \quad (69)$$

где $p_{нач}$ – начальное давление в сосуде,

$$t = \frac{1000}{0,45} \ln \frac{10^{-1} - \frac{19,5 \cdot 10^{-1}}{0,45}}{1 - \frac{19,5 \cdot 10^{-1}}{0,45}} \cdot \frac{1}{2} = 11922 \text{ [с]},$$

$$11922 \text{ [с]} \leq 12000 \text{ [с]}.$$

Таким образом, полученное время предварительной откачки меньше заданного. Следовательно, принятые для расчета параметры насоса, удовлетворяют предъявляемые к нему требования.

3 РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ

3.1 Обеспечение прочности конструкции

Задача прочностного расчета – подтверждение несущей способности элементов камеры.

При расчете прочности учитываются особенности и условия эксплуатации и изготовления реальной конструкции, ее поведение при нагружении, характер разрушения конструкции в целом и отдельных ее элементов, также необходимо учитывать особенности материала, влияющие на конструктивную прочность.

Конструкция будет находиться в работоспособном состоянии, если во всех заданных условиях эксплуатации не будут нарушены принятые при проектировании нормы прочности. Комплекс работ, направленных на обеспечение прочности, можно разбить на следующие основные этапы:

- анализ режимов эксплуатации;
- проектирование конструкции;
- выбор материалов;
- расчет на прочность;
- экспериментальная отработка и проверка прочности.

Все эти этапы взаимосвязаны и не могут рассматриваться изолированно друг от друга. Работы в соответствии с этим ведутся с разной интенсивностью в процессе всей отработки изделия. При изменении условий эксплуатации или при изменении конструкции пересматриваются расчетные случаи, корректируются нагрузки и расчеты прочности, определяются требуемые для обеспечения прочности изменения конструкции и при необходимости проводятся дополнительные экспериментальные проверки.

3.2 Эпюры сил и моментов

На рисунке 10 изображена вакуумная камера.

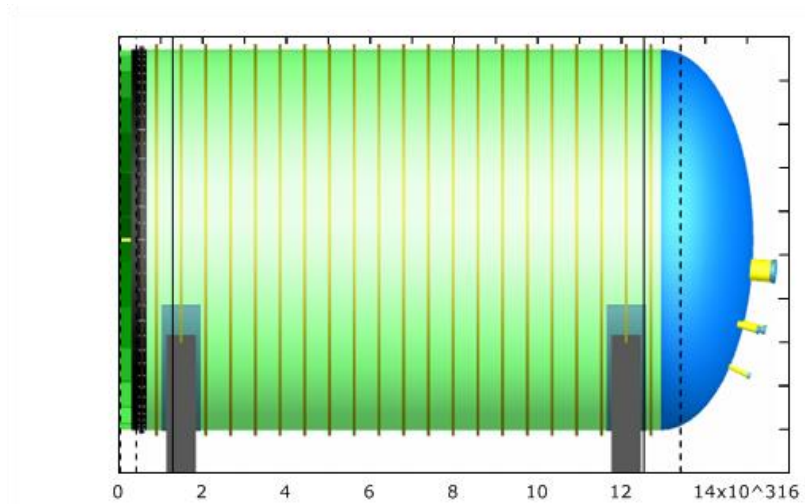


Рисунок 10 – Схема вакуумной установки

Схема построение эпюр перемещения представлена на рисунке 11.

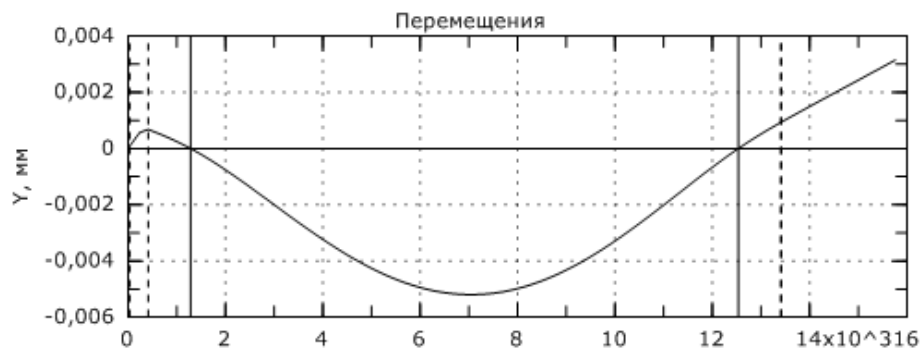


Рисунок 11 – Схема построения эпюр перемещения

Схема построение эпюр поперечного усилия представлена на рисунке 12.

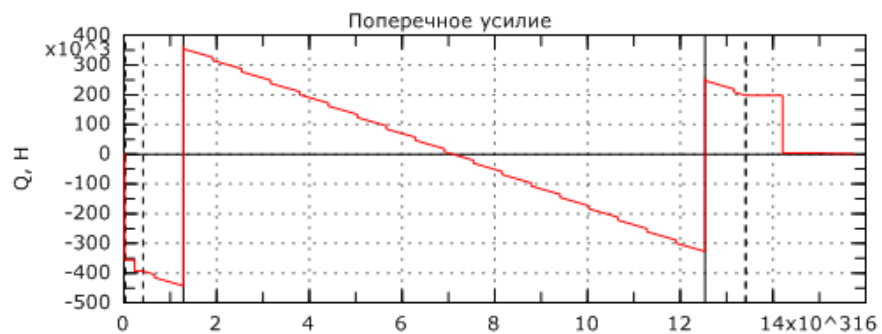


Рисунок 12 – Схема построения эпюр поперечного усилия

Схема построение эпюр изгибающего момента представлена на рисунке

13.

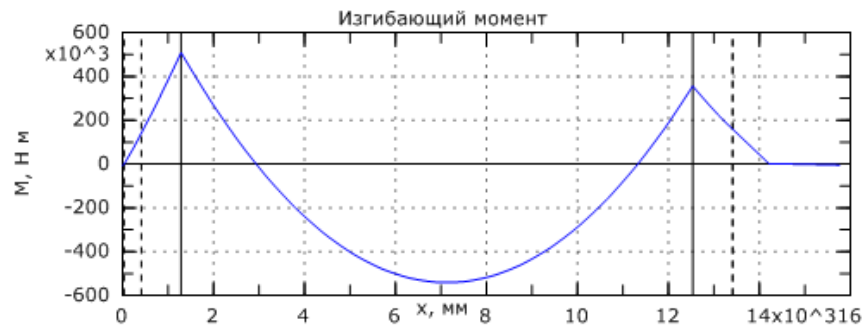


Рисунок 13 – Схема построения эпюр изгибающего момента

Схема построение эпюр критерий прочности и устойчивости представлена на рисунке 14.

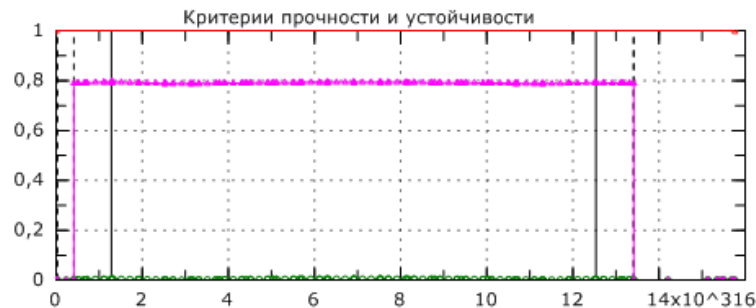


Рисунок 14 – Схема построения эпюр критерий прочности и устойчивости:

--o---o-- – Критерий прочности, ^^^^ – Критерий устойчивости,
 ----- – Предельное значение

3.3 Вес элементов вакуумной установки

Крышка с рёбрами: $G_i = 3,559318 \cdot 10^5$ [Н];

Фланцевое соединение: $G_i = 3,744231 \cdot 10^4$ [Н];

Обечайка цилиндрическая: $G_i = 5,806744 \cdot 10^5$ [Н];

Кольцо жёсткости: $G_i = 1,050719 \cdot 10^4$ [Н];

Днище торосферическое: $G_i = 1,940281 \cdot 10^5$ [Н];

Штуцер: $G_i = 633,7613$ [Н];

Общий вес: $\sum G_i = 1,39 \cdot 10^6$ Н;

Опорные нагрузки:

Опора №1:

Реакция опоры: $F = 5,848794 \cdot 10^5$ [Н];

Поперечное усилие в обечайки над опорой: $Q = 3,264 \cdot 10^5$ [Н];

Изгибающий момент в обечайке над опорой: $M = 3,566 \cdot 10^5$ [Н·м];

Опора №2:

Реакция опоры: $F = 8,07478 \cdot 10^5$ [Н];

Поперечное усилие в обечайки над опорой: $Q = 4,39 \cdot 10^5$ [Н];

Изгибающий момент в обечайки над опорой: $M = 5,091 \cdot 10^5$ [Н·м].

3.4 Расчет на прочность крышки с рёбрами

- сталь 12X18Н10Т;
- внутренний диаметр вакуумной камеры $D = 9$ [м];
- толщина цилиндрической части, $s = 0,022$ [м];
- толщина крышки, $s_1 = 0,02$ [м];
- прибавка для компенсации коррозии и эрозии, $c_1 = 0,001$ [м];
- прибавка для компенсации минусового допуска, $c_2 = 0,0008$ [м];
- прибавка к расчётной толщине стенки, $c = 0,002$ [м];
- число рёбер жёсткости, $n = 26$;
- расчётный диаметр днища, $D_p = D = 9$ [м];
- материал бобышки: 12X18Н10Т;
- наружный диаметр бобышки, $d_0 = 1$ [м];
- высота бобышки, $H_0 = 0,37$ [м].

На рисунке 15 изображена схема крышки с ребрами

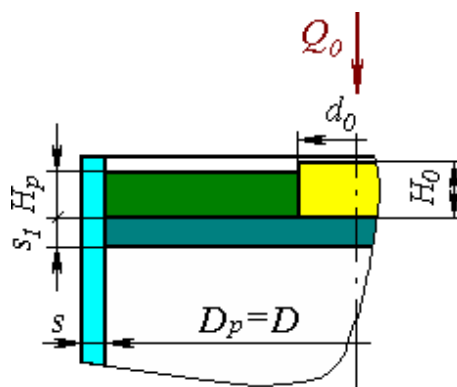


Рисунок 15 – Схема крышки с ребрами

Расчёт рёбер жёсткости.

Расстояние от центра тяжести поперечного сечения ребра жесткости до его основания:

$$e_0 = e_k = 0,187 \text{ [м]}.$$

Относительный наружный радиус втулки:

$$\rho_0 = \frac{d_0}{D_p}, \quad (70)$$

$$\rho_0 = 1 \cdot 10^3 / 9 \cdot 10^3 = 0,1111111 \text{ [мм]}.$$

Расчетная высота втулки:

$$H_{0p} = \min \left\{ H_0; (H_p + s_1 + h_0) \right\}, \quad (71)$$

$$H_{0p} = \min \{ 370; (360 + 20 + 0) \} = 0,37 \text{ [м]}.$$

Расчётная температура, $T = 100 \text{ [}^\circ\text{C]}$;

Расчётное наружное избыточное давление, $p = 0,2 \cdot 10^6 \text{ [Па]}$.

Свойства материала втулки (бобышки):

Допускаемые напряжения для стали 12Х18Н10Т при температуре $t = 100 \text{ [}^\circ\text{C]}$:

$$[\sigma]_0 = 174 \cdot 10^6 \text{ [Па]}.$$

Свойства материала днища:

Допускаемые напряжения для нержавеющей стали 12Х18Н10Т при температуре $t = 100 \text{ [}^\circ\text{C]}$:

$$[\sigma]_1 = 174 \cdot 10^6 \text{ [Па]}.$$

Свойства материала ребра:

Допускаемые напряжения для нержавеющей стали 12Х18Н10Т при температуре $t = 100 \text{ [}^\circ\text{C]}$:

$$[\sigma]_p = 174 \cdot 10^6 \text{ [Па]}.$$

Расстояние от срединной до нейтральной поверхности крышки:

$$e = \frac{n \cdot A_p \cdot [\sigma_p]}{2 \cdot \pi \cdot D_p \cdot [\sigma_1]}, \quad (72)$$

$$e = 26 \cdot 0,0216 \cdot 174 / (2 \cdot 3,141593 \cdot 9 \cdot 10^3 \cdot 174) = 0,009 \text{ [м]}.$$

Изгибающий момент крышки, отнесенный к длине контура:

$$M_1 = [\sigma_1] \cdot \left[e^2 + \left(\frac{s_1 - c}{2} \right)^2 \right], \quad (73)$$

$$M_1 = 174 \cdot [9,931268^2 + ((20 - 2) / 2)^2] = 3,125564 \cdot 10^4 \text{ [Н]}.$$

Суммарный изгибающий момент, отнесенный к длине контура:

$$M_c = M_1 + \frac{n \cdot \phi_p \cdot A_p \cdot [\sigma_p]}{\pi \cdot D_p} \cdot \left[e_0 - e + \left(\frac{s_1 - c}{2} \right) \right], \quad (74)$$

$$M_c = 3,125564 \cdot 10^4 + 174 \cdot 1 \cdot 26 \cdot 0,0216 / (3,141593 \cdot 9 \cdot 10^3) \times (187,5 - 9,931268 + (20 - 2) / 2) = 6,760524 \cdot 10^5 \text{ [Н]}.$$

Условие выполнения прочности при действии дополнительного усилия, действующего на центральную часть крышки:

$$0,9 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot M_c}{1 - \rho_0} \geq Q_0, \quad (75)$$

$$0,9 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot M_c}{1 - \rho_0} = 0,9 \cdot 2 \cdot 3,141593 \cdot 6,760524 \cdot 10^5 / (1 - 0,1111111) = 4,3 \cdot 10^6 \text{ [Н]};$$

$$4,3 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 0 \text{ [Н]}.$$

Условие прочности и устойчивости выполнено.

Расчетное допускаемое давление, действующее на плоскую крышку в целом:

$$[p_1] = \frac{12 \cdot [2 \cdot \pi \cdot M_c + Q_0 \cdot (1 - \rho_0)]}{\pi \cdot D_p^2 \cdot (1 - \rho_0^2)}, \quad (76)$$

$$[p_1] = 12 \cdot [2 \cdot 3,141593 \cdot 6,760524 \cdot 10^5 + 0 \cdot (1 - 0,1111111)] / (3,141593 \times (9 \cdot 10^3)^2 \cdot (1 - 0,1111111^2)) = 0,2028157 \text{ [МПа]}.$$

Расчетное допускаемое давление, действующее между ребрами на крышке:

$$[p_2] = \frac{12 \cdot [\sigma_1] \cdot (s_1 - c)^2 \cdot \left(1 + \sin \frac{\pi}{n}\right)^2}{\pi \cdot D_p^2 \cdot \left(\sin \frac{\pi}{n}\right)^2}, \quad (77)$$

$$[p_2] = 12 \cdot 174 \cdot (20 - 2)^2 \cdot (1 + \sin(3,141593/26))^2 / [3,141593 \cdot (9 \cdot 10^3)^2 \times (\sin(3,141593 / 26))^2] = 0,2297494 \text{ [МПа]}.$$

Допускаемое избыточное давление:

$$[p] = \min \{ [p_1] \}; \{ [p_2] \}, \quad (78)$$

$$[p] = \min \{ 0,2028157; 0,2297494 \} = 0,2028157 \text{ [МПа]};$$

$$0,2028157 \text{ [МПа]} \geq 0,2 \text{ [МПа]}.$$

Условие прочности и устойчивости выполнено.

Расчёт при проведении испытаний.

Расчётная температура, $T = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$;

Расчётное внутреннее избыточное давление, $P_{ucn} = 0,13 \text{ [МПа]}$.

Расчёт на прочность при испытаниях не проводится, если выполнено условие:

$$P_{исп} \leq 1,35 \cdot P_{расч} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}, \quad (79)$$

$$1,35 \cdot P_{расч} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,35 \cdot 0,2 \cdot 184 / 174 = 0,2855172 \text{ [МПа];}$$

$$0,13 \text{ [МПа]} \leq 0,2855172 \text{ [МПа]}.$$

Условие прочности выполнено.

Свойства материала втулки (бобышки), днища, ребра:

Допускаемые напряжения для нержавеющей стали 12Х18Н10Т при температуре $t = 20$ [°C]:

$$[\sigma]_i^{20} = \eta \cdot Re_{20} / n_T, \quad (80)$$

$$[\sigma]_0^{20} = 1 \cdot 276 / 1,2 = 230 \text{ [МПа]}.$$

Расстояние от срединной поверхности днища до нейтральной поверхности:

$$e = \frac{n \cdot A_p \cdot [\sigma_p]}{2 \cdot \pi \cdot D_p \cdot [\sigma_1]}, \quad (81)$$

$$e = 26 \cdot 0,0216 \cdot 230 / (2 \cdot 3,141593 \cdot 9 \cdot 10^3 \cdot 230) = 0,009 \text{ [м]}.$$

Расчетный изгибающий момент крышки, отнесенный к длине контурной линии, рассчитывается в соответствии с формулой (73):

$$M_1 = 230 \cdot [9,931268^2 + ((20 - 2) / 2)^2] = 4,131492 \cdot 10^4 \text{ [Н]}.$$

Расстояние от центра тяжести поперечного сечения ребра жесткости до его основания:

$$e_0 = e_k = 0,187 \text{ [м]}.$$

Расчетный суммарный изгибающий момент, отнесенный к длине контура, рассчитывается в соответствии с формулой (74):

$$M_c = 4,131492 \cdot 10^4 + 230 \cdot 1 \cdot 26 \cdot 0,0216 / (3,141593 \cdot 9 \cdot 10^3) \times (187,5 - 9,931268 + (20 - 2) / 2) = 8,936324 \cdot 10^5 \text{ [Н]}.$$

Условие выполнения прочности при действии дополнительных усилий действующих на центральную часть плоской крышки рассчитывается в соответствии с формулой (75):

$$0,9 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot M_c}{1 - \rho_0} = 0,9 \cdot 2 \cdot 3,141593 \cdot 8,936324 \cdot 10^5 / (1 - 0,111111) = 5,685 \cdot 10^6 \text{ [Н]};$$

$$5,685 \cdot 10^6 \text{ Н} \geq 0 \text{ [Н]}.$$

Условие прочности и устойчивости выполнено.

Расчетное допускаемое давление, действующее на плоское днище в целом рассчитывается в соответствии с формулой (76):

$$[p_1] = 12 \cdot [2 \cdot 3,141593 \cdot 8,936324 \cdot 10^5 + 0 \cdot (1 - 0,111111)] / (3,141593 \times (9 \cdot 10^3)^2 \cdot (1 - 0,111111)^2) = 0,2680897 \text{ [МПа]}.$$

Расчетное допускаемое давление, действующее в промежутке между ребрами рассчитывается в соответствии с формулой (77):

$$[p_2] = 12 \cdot 230 \cdot (20 - 2)^2 \cdot (1 + \sin(3,141593 / 26))^2 / [3,141593 \cdot (9 \cdot 10^3)^2 \times (\sin(3,141593 / 26))^2] = 0,3036917 \text{ [МПа]}.$$

Допускаемое избыточное давление:

$$[p] = \min \{ [p_1] \}; \{ [p_2] \}, \tag{82}$$

$$[p] = \min \{ 0,2680897; 0,3036917 \} = 0,2680897 \text{ [МПа]}.$$

$$0,2680897 \text{ [МПа]} \geq 0,13 \text{ [МПа]}.$$

Условие прочности и устойчивости выполнено.

3.5 Расчет на прочность цилиндрической обечайки

Сталь 12X18Н10Т;

Внутренний диаметр обечайки, $D = 9$ [м];

Толщина стенки обечайки, $s = 0,02$ [м];

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, $c_1 = 0,001$ [м];

Прибавка для компенсации минусового допуска, $c_2 = 0,8$ [мм];

Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, $c = 0,002$ [м];

Длина обечайки, $L = 13$ [м].

Сопряжённые элементы жёсткости:

Кольцо жёсткости $i=1 \dots 21$;

Ширина, $t_i = 70$ [мм];

Площадь сечения, $A_{ki} = 0,0048$ [м²];

Момент инерции, $I_{ki} = 0,1184 \cdot 10^{-4}$ [м⁴];

Коэффициент жёсткости обечайки, подкреплённой кольцом, $k = 9,76418$.

На рисунке 18 изображена схема обечайки цилиндрической.

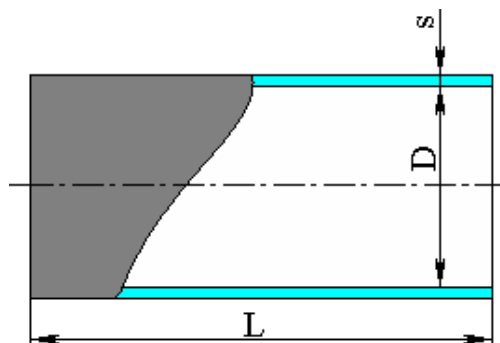


Рисунок 16 – Схема обечайки цилиндрической

Расчёт прочности обечайки в рабочих условиях:

Расчётная температура, $T = 100$ [°C];

Расчётное наружное избыточное давление, $p = 0,2$ [МПа].

Допускаемые напряжения для стали 12X18Н10Т при температуре $t = 100$ [°C]:

$[\sigma] = 174$ [МПа].

Модуль продольной упругости для стали 12Х18Н10Т при температуре $t = 100$ °С:

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ [МПа]}.$$

Длина для расчёта устойчивости обечайки:

$$L = 1,454446 \cdot 10^4 \text{ [мм]}.$$

$$B_2 = \min \left\{ 1, 9,45 \cdot \frac{D}{L} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot k \cdot (s - c)}} \right\}, \quad (83)$$

$$B_2 = \min \{ 1; 9,45 \cdot 9 \cdot 10^3 / 1,454446 \cdot 10^4 \cdot (9 \cdot 10^3 / (100 \cdot 7,660267 \times (20 - 2)))^{1/2} \} = 1.$$

Допускаемое давление из условия устойчивости:

$$|p|_{1E} = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D}{k \cdot n_y \cdot B_2} \cdot \frac{D}{L} \cdot \left[\frac{100 \cdot k \cdot (s - c)}{D} \right], \quad (84)$$

$$|p|_{1E} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 9 \cdot 10^3 / (7,660267 \cdot 2,4 \cdot 1 \cdot 1,454446 \cdot 10^4) \times \\ \times (100 \cdot 7,660267 \cdot (20 - 2) / 9 \cdot 10^3) = 0,4067876 \text{ [МПа]}.$$

Расстояние между кольцами жесткости при расчёте действия давления:

$$l = 987,2319 \text{ [мм]}.$$

Допускаемое давление исходя из условий прочности:

$$[p]_{1II} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c) + \frac{A_{kl}}{l} \cdot [\sigma]_{kl}}{D + (s - c)}, \quad (85)$$

$$[p]_{1II} = [2 \cdot 174 \cdot (20 - 2) + 0,0048 \cdot 174 / 987,2319 + 0 \cdot 0 / 987,2319] / \\ / (9 \cdot 10^3 + 20 - 2) = 0,7884234 \text{ [МПа]}.$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости всей обечайки:

$$[p]_I = \frac{[p]_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{II}}{[p]_{IE}}\right)^2}}, \quad (86)$$

$$[p]_I = 0,7884234 / (1 + (0,7884234 / 0,4067876)^2)^{1/2} = 0,3615061 \text{ [МПа]}.$$

Допускаемое давление исходя из условий устойчивости:

$$|p|_{IE} = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E \cdot D}{n_y \cdot B_1 \cdot l} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5}, \quad (87)$$

$$|p|_{IE} = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 9 \cdot 10^3 / (2,4 \cdot 1 \cdot 987,2319) \cdot (100 \cdot (20 - 2) / 9 \cdot 10^3)^{2.5} =$$

$$= 0,2826704 \text{ [МПа]};$$

$$\lambda_{II}^2 = \frac{b^2}{D \cdot (s - c)} = 987,2319^2 / (9 \cdot 10^3 \cdot (20 - 2)) = 6,016215. \quad (88)$$

Допускаемое давление исходя из условий прочности:

$$[p]_{II} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} \cdot \frac{2 + \lambda_{II}^2}{1 + \frac{\phi_T \cdot \lambda_{II}^2}{\phi_P}}, \quad (89)$$

$$[p]_{II} = 2 \cdot 174 \cdot (20 - 2) / (9 \cdot 10^3 + 20 - 2) \cdot [2 + 6,016215] / [1 + (1,0 \times$$

$$\times 6,016215) / 1] = 0,7936116 \text{ [МПа]}.$$

Допускаемое наружное давление исходя из условий устойчивости обечайки между кольцами жёсткости:

$$[p]_2 = \frac{[p]_{2П}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{2П}}{[p]_{2E}}\right)^2}}, \quad (90)$$

$$[p]_2 = 0,7936116 / (1 + (0,7936116 / 0,2826704)^2)^{1/2} = 0,2662835 \text{ [МПа]}.$$

Допускаемое наружное давление:

$$[p] = \min \{ [p_1]; [p_2] \}, \quad (91)$$

$$[p] = \min \{ 0,3615061; 0,2662835 \} = 0,2662835 \text{ [МПа]}.$$

$$0,2662835 \text{ [МПа]} \geq 0,2 \text{ [МПа]}.$$

Условие прочности и устойчивости выполнено.

Расчетная толщина обечайки:

$$s_p + c = 17,94745 \text{ [мм]}.$$

Расчетная длина обечайки (без учёта жёсткости, при давлении $p=0,2$ [МПа] и толщине стенки 18 [мм]):

$$l_p = 1336,2 \text{ [мм]}.$$

Для расчёта обечайки от действия седловых опор:

$$B_1 = \min \left\{ 1, 9,45 \cdot \frac{D}{l} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right\}, \quad (92)$$

$$B_1 = \min \{ 1,0, 9,45 \cdot 9 \cdot 10^3 / 1,022232 \cdot 10^3 \cdot (9 \cdot 10^3 / (100 \cdot (20 - 2)))^{1/2} \} = 1.$$

Допускаемое наружное давление исходя из условий устойчивости по формуле (87):

$$[p]_e = 20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 9 \cdot 10^3 / (2,4 \cdot 1 \cdot 1,022232 \cdot 10^3) \cdot (100 \cdot (20 - 2) / 9 \cdot 10^3)^{2,5} = 0,2729921 \text{ [МПа]}.$$

Допускаемое наружное давление исходя из условий прочности:

$$[p] = \frac{[p]_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{II}}{[p]_E}\right)^2}}, \quad (93)$$

$$[p]_{II} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot 174 \cdot (20 - 2)}{9 \cdot 10^3 + 20 - 2} = 0,6946108 \text{ [МПа]}; \quad (94)$$

$$[p] = 0,6946108 / (1 + (0,6946108 / 0,2729921)^2)^{1/2} = 0,2540742 \text{ [МПа]}.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$[F]_{II} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot [\sigma], \quad (95)$$

$$[F]_{II} = 3,141593 \cdot (9 \cdot 10^3 + 20 - 2) \cdot (20 - 2) \cdot 174 = 8,873232 \cdot 10^7 \text{ [Н]}.$$

Допускаемое осевое усилие на сжатие, исходя из условий местной устойчивости:

$$|F|_{E1} = \frac{310 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5}, \quad (96)$$

$$|F|_{E1} = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot (9 \cdot 10^3)^2 / (2,4) \cdot (100 \cdot 20 - 2) / 9 \cdot 10^3)^{2.5} = 3,743178 \cdot 10^7 \text{ [Н]}.$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$[F] = \frac{[F]_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{II}}{[F]_{E1}}\right)^2}}, \quad (97)$$

$$[F]=8,873232 \cdot 10^7 / (1 + (8,873232 \cdot 10^7 / 3,743178 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 3,44886 \cdot 10^7 \text{ [Н]}.$$

Допускаемое осевое растягивающее усилие:

$$[F]=[F]_{\Pi} \cdot \phi_t, \quad (98)$$

$$[F]=8,873232 \cdot 10^7 \cdot 1=8,873232 \cdot 10^7 \text{ Н}.$$

Допускаемый изгибающий момент исходя, из условий прочности при действии сил на растяжение:

$$[M]_{np} = \frac{D}{4}[F], \quad (99)$$

$$[M]_{np} = 9 \cdot 10^3 / 4 \cdot 8,873232 \cdot 10^7 = 1,996477 \cdot 10^8 \text{ [Н·м]}.$$

Допускаемый изгибающий момент, исходя из условий прочности при действии сил на сжатие:

$$[M]_{\Pi} = \frac{D}{4}[F]_{\Pi}, \quad (100)$$

$$[M]_{\Pi} = 9 \cdot 10^3 / 4 \cdot 8,873232 \cdot 10^7 = 1,996477 \cdot 10^8 \text{ [Н·м]}.$$

Допускаемый изгибающий момент, исходя из условий устойчивости при возникновении упругих деформаций:

$$[M]_E = \frac{D}{3,5}[F]_{E1}, \quad (101)$$

$$[M]_E = 9 \cdot 10^3 / 3,5 \cdot 3,743178 \cdot 10^7 = 9,625314 \cdot 10^7 \text{ [Н·м]}.$$

Допускаемый изгибающий момент, исходя из условий устойчивости:

$$[M]_{ycm} = \frac{[M]_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{II}}{[M]_E}\right)^2}}, \quad (102)$$

$$[M]_{ycm} = 1,996477 \cdot 10^8 / (1 + (1,996477 \cdot 10^8 / 9,625314 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 8,67 \cdot 10^7 \text{ [Н·м]}.$$

Допускаемый изгибающий момент:

$$[M] = \min\{M_{np}, M_{ycm}\}, \quad (103)$$

$$[M] = \min\{1,996477 \cdot 10^8, 8,67 \cdot 10^7\} = 8,67 \cdot 10^7 \text{ [Н·м]}.$$

Допускаемое поперечное усилие, исходя из условий прочности:

$$[Q]_{II} = 0,25 \cdot \pi \cdot D \cdot (s - c) \cdot [\sigma], \quad (104)$$

$$[Q]_{II} = 0,25 \cdot 3,141593 \cdot 9 \cdot 10^3 \cdot (20 - 2) \cdot 174 = 2,21388 \cdot 10^7 \text{ [Н]}.$$

Длина для расчёта опор:

$$l_s = 1,125 \cdot 10^4 \text{ [мм]}.$$

Допускаемое поперечное усилие, исходя из условий устойчивости:

$$[Q]_E = \frac{2,4 \cdot E \cdot (s - c)^2}{n_y} \cdot \left[0,18 + 3,3 \cdot \frac{D \cdot (s - c)}{l_s^2} \right], \quad (105)$$

$$[Q]_E = 2,4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot (20 - 2)^2 / 2,4 \cdot (0,18 + 3,3 \cdot 9 \cdot 10^3 \cdot (20 - 2) / (1,125 \cdot 10^4)^2) =$$

$$= 1,193772 \cdot 10^7 \text{ [Н]}.$$

Допускаемое поперечное усилие:

$$[Q] = \frac{[Q]_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[Q]_{II}}{[Q]_E}\right)^2}}, \quad (106)$$

$$[Q] = 2,21388 \cdot 10^7 / (1 + (2,21388 \cdot 10^7 / 1,193772 \cdot 10^7)^2)^{1/2} = 1,050748 \cdot 10^7 \text{ [Н]}.$$

3.6 Расчет на прочность кольца жёсткости

Исходные данные:

Элемент, несущий кольцо: Обечайка цилиндрическая;

Материал: 12X18H10T;

Расположение кольца: Снаружи обечайки;

Диаметр обечайки, $D = 9$ [м];

Ширина приваренного участка, $t = 0,07$ [м];

Расстояние между полками, $h = 0,1$ [м];

Толщина верхней полки, $s_5 = 0,02$ [м];

Толщина вертикальной полки, $s_4 = 0,02$ [м];

Толщина нижней полки, $s_6 = 0,02$ [м].

На рисунке 19 изображена схема кольца жёсткости.

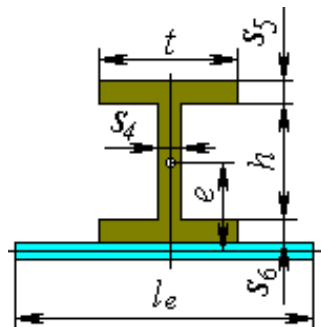


Рисунок 17 – Схема кольца жёсткости

Расчётная температура, $T = 100$ [°C];

Расчётное наружное избыточное давление, $p = 0,2$ [МПа].

Свойства материала:

Допускаемые напряжения для материала 12X18H10T при температуре $t=100$ [°C]:

$$[\sigma]_k = 174 \text{ [МПа]}.$$

Площадь поперечного сечения:

$$A_k = t \cdot (s_5 + s_6) + s_4 \cdot h, \quad (107)$$

$$A_k = 70 \cdot (20 + 20) + 20 \cdot 100 = 0,0048 \text{ [м}^2\text{]}.$$

Расстояние от центра тяжести сечения до срединной поверхности обечайки:

$$e = \frac{s_4 \cdot h \cdot (h + 2 \cdot s_6) + t \cdot s_5 \cdot (2 \cdot h + 2 \cdot s_6 + s_5) + t \cdot s_6^2}{2 \cdot (t \cdot (s_5 + s_6) + s_4 \cdot h)} + \frac{s - c}{2}, \quad (108)$$

$$e = [20 \cdot 100 \cdot (100 + 2 \cdot 20)^2 + 70 \cdot 20 \cdot (2 \cdot 100 + 2 \cdot 20 + 20) + 70 \times 20^2] / [2 \cdot (70 \cdot (20 + 20) + 20 \cdot 100)] + (20 - 2) / 2 = 79 \text{ [мм]}.$$

Расстояние между центром тяжести поперечного сечения и поверхностью обечайки:

$$e_k = e - \frac{s - c}{2}, \quad (109)$$

$$e_k = 79 - (20 - 2) / 2 = 70 \text{ [мм]}.$$

Момент инерции сечения:

$$e = \frac{1}{3} \cdot s_4 \cdot \left((h + s_6 - e_k)^3 + (e_k - s_6)^3 \right) + \frac{1}{12} \cdot t \cdot s_6 \left(s_6^2 + 12 \cdot \left(e_k - \frac{s_6}{2} \right)^2 \right) + \frac{1}{12} \cdot t \cdot s_5 \left(s_5^2 + 12 \cdot \left(h + s_6 - e_k - \frac{s_5}{2} \right)^2 \right), \quad (110)$$

$$e = 1/3 \cdot 20 \cdot ((100 + 20 - 70)^3 + (70 - 20)^3) + 1/12 \cdot 70 \cdot 20 \cdot (20^2 + 12 \times (70 - 20/2)^2) + 1/12 \cdot 70 \cdot 20 \cdot (20^2 + 12 \cdot (100+20 - 70 + 20/2)^2) = 0,1184 \cdot 10^{-4} [\text{м}^4].$$

Расстояние до элемента жёсткости:

$$l_1 = 625 [\text{мм}].$$

Эффективная длина стенки обечайки:

$$l_e = \min \left\{ l_1; t + 1,1 \cdot \sqrt{D \cdot (s - c)} \right\}, \quad (111)$$

$$l_e = \min \{ 625; 70 + 1,1 \cdot (9 \cdot 10^3 \cdot (20 - 2))^{1/2} \} = 512,74 [\text{мм}].$$

Эффективный момент инерции поперечного сечения:

$$I_e = I_K + \frac{l_1 \cdot (s - c)^3}{10,9} + e^2 \cdot \frac{A_K \cdot l_e \cdot (s - c)}{A_K + l_e \cdot (s - c)}, \quad (112)$$

$$I_e = 0,1184 \cdot 10^{-4} + 625 \cdot (20 - 2)^3 / 10,9 + 79^2 \cdot (0,0048 \cdot 512,7415 \cdot (20 - 2)) / (0,0048 + 512,7415 \cdot (20 - 2)) = 0,3188179 \cdot 10^{-4} [\text{м}^4].$$

Коэффициент жёсткости обечайки, подкреплённой кольцом жесткости:

$$k = \sqrt{\frac{10,9 \cdot I}{l_1 \cdot (s - c)^3}}, \quad (113)$$

$$k = (10,9 \cdot 0,3188179 \cdot 10^{-4} / (625 \cdot (20 - 2)^3))^{1/2} = 9,76418.$$

3.7 Расчет на прочность днища торосферического

Сталь 12X18Н10Т;

Внутренний диаметр цилиндрической части крышки, $D = 9 [\text{м}]$;

Толщина стенки крышка, $s_1 = 0,024 [\text{м}]$;

Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, $c_1 = 0,001 [\text{м}]$;

Прибавка для компенсации минусового допуска, $c_2 = 0,0008 [\text{м}]$;

Сумма прибавок к расчётной толщине стенки, $c = 0,002$ [м];

Радиус кривизны при вершине крышки, $R = 7,1$ [м];

Радиус скругления, $r_1 = 1,4$ [м];

Наружный диаметр крышки, $D_1 = D + 2 \cdot s_1 = 9,048$ [м].

На рисунке 22 изображена схема торосферического днища.

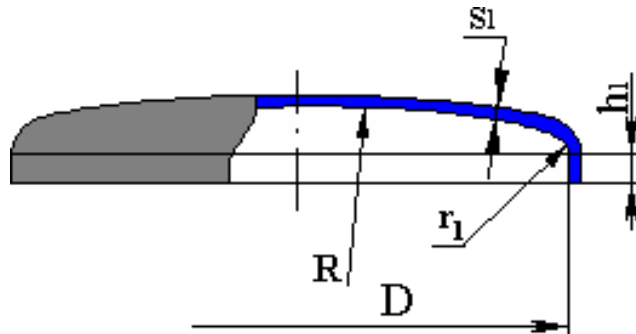


Рисунок 18 – Торосферическое днище

Расчётная температура, $T = 100$ [°C];

Расчётное наружное избыточное давление, $p = 0,2$ [МПа].

Допускаемые напряжения:

Допускаемые напряжения для материала 12X18H10T при температуре $t=100$ [°C]:

$[\sigma]=174$ [МПа].

Модуль продольной упругости для материала 12X18H10T при температуре $t = 100$ [°C]:

$E=2 \cdot 10^5$ [МПа].

Расчётная толщина стенки с учётом прибавок определяется с помощью итерации:

$$s = s_p + c = 23,766 \text{ [мм]}. \quad (114)$$

Допускаемое давление из условия прочности краевого сечения:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \phi \cdot (s_1 - c)}{D_1 \cdot \beta_2}, \quad (115)$$

$$[p] = 2 \cdot 174 \cdot 1 \cdot (24 - 2) / (9,048 \cdot 10^3 \cdot 1,276397) = 0,662924 \text{ [МПа]}.$$

Допускаемое наружное давление из условия прочности:

$$[p]_{II} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (s_1 - c)}{R + 0,5 \cdot (s_1 - c)}, \quad (116)$$

$$[p]_{II} = 2 \cdot 174 \cdot (24 - 2) / (7,1 \cdot 10^3 + 0,5 \cdot (24 - 2)) = 1,076642 \text{ [МПа]}.$$

Допускаемое наружное давление из условия устойчивости:

$$[P] = \frac{[P]_{II}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[P]_{II}}{[P]_E}\right)^2}}, \quad (117)$$

$$[P]_E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (s_1 - c)}{K_s \cdot R} \right]^2, \quad (118)$$

$$[P]_E = 26 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 / 2,4 \cdot (100 \cdot 24 - 2) / (1 \cdot 7,1 \cdot 10^3)^2 = 0,208 \text{ [МПа]};$$

$$[P] = 1,076642 / (1 + (1,076642 / 0,208)^2)^{1/2} = 0,2042498 \text{ [МПа]} \geq 0,2 \text{ [МПа]}.$$

4 ОПИСАНИЕ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ

4.1 Вакуумные испытания КА

Вакуумные испытания КА обеспечивает проведение отработку теплофизических параметров КА и его составных частей.

Время достижения максимального вакуума в вакуумной камере не должно превышать 24 часов.

Система терморегулирования камер должна состоять из излучающего экрана медного или алюминиевого, через который протекает газообразный или жидкий азот для нагрева или охлаждения экрана.

Внутренняя поверхность экрана черная, для достижения коэффициента эмиссии выше, чем 0,9, внешняя поверхность экрана полирована для получения коэффициента эмиссии 0,1.

Для охлаждения экрана, возможно применять жидкий азот для имитации космической тени или газообразный для менее жесткого охлаждения (> -70 °С).

Система подачи жидкого азота оборудованный насосами и системой охлаждения азота, должен быть установлен снаружи корпуса здания на бетонной подушке.

Система разгерметизации должна безопасно возвращать атмосферное давление в вакуумную камеру.

Дополнительно для имитации солнечного излучения может быть предусмотрена возможность использования инфракрасных или ксеноновых ламп.

4.1.1 Технические параметры вакуумной камеры для проведения вакуумных испытаний

Характеристики камеры:

- диаметр внутренний: 9 [м];
- длина: 16 [м];
- Объем камеры 1000 [м³];
- Рабочее давление в камере: 10^{-8} [Па];
- Время откачки камеры до рабочего давления с изделием не более 24 ч;

– Время разгерметизации: 40...80 [мин].

Продолжительность цикла испытаний: до 200 [ч] и более.

Габаритные размеры испытываемого изделия:

– максимальный диаметр: 5500 [мм];

– максимальная длина: 10000 [мм];

– максимальная масса испытываемого изделия: 10 [т].

4.1.2 Система вакуумирования

Система вакуумирования состоит из трех подсистем и позволяет достигать вакуума 10^{-8} [Па].

Система вакуумирования предназначена для создания в камере необходимого разрежения и поддержания его в процессе испытаний изделий на герметичность.

Система вакуумирования состоит из двух подсистем:

– Системы форвакуумной откачки;

– Системы высоковакуумной откачки.

1) Система форвакуумной откачки предназначена для откачки воздуха камеры в диапазоне давления от $1,01 \cdot 10^{-5}$ Па до 1,33 Па.

В состав системы форвакуумной откачки входят:

– два вакуумных золотниковых агрегата НВЗ-500;

– два двухроторных вакуумных насоса 2ДВН-1500;

– трубопроводы, соединяющие камеры с оборудованием системы;

– запорно-регулирующая арматура;

– контрольно-измерительные приборы.

2) Система высоковакуумной откачки предназначена для откачки воздуха из камеры в диапазоне давлений от 1,33 до $1,33 \cdot 10^{-8}$ Па и поддержания в ней рабочего давления не менее $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па в течении всего цикла испытаний.

В состав системы входят:

– два турбомолекулярных насосов ТМН-5000;

– один криогенный насос серий Marathon CP-16;

- трубопроводы, соединяющие высоковакуумное оборудование с системой форвакуумной откачки;
- контрольно-измерительные приборы.

4.1.3 Система разгерметизации

Система разгерметизации применяется для напуска в камеру сухого сжатого воздуха после завершения испытаний для повышения давления в камере.

Техническая характеристика системы:

- Время разгерметизации до 80 [мин];
- Рабочее давление:
 - в линии до редуктора в цеховой магистрали – 20 [МПа];
 - в линии после редукторов – 0,2 [МПа].

4.1.4 Система подачи жидкого азота

Жидкий азот подается по трубам к вакуумной камере для охлаждения экранов. Емкость с жидким азотом вакуумируют с помощью блока откачки для понижения температуры азота до температуры ниже кипения 68К. Блок откачки используется для откачивания паров жидкого азота и его переохлаждения до требуемой температуры.

Откачивание производится с помощью газовых эжекторов. Подвод к блоку откачки технологического газа – азота давлением (21 ± 1) [кг/см²], управляющего давления воздуха (47 ± 5) [кгс/см²] и регулировку давлений в указанных диапазонах обеспечивается потребителем.

Блок откачки включает в себя:

1) Два эжектора, подключенных к откачиваемому объему параллельно. В качестве рабочего газа для эжекторов используется газообразный азот с точкой росы не выше минус 55° С.

2) Входной трубопровод. Трубопровод соединяет откачиваемый объем с эжекторами. На трубопроводе установлен мановакууметр для контроля фактического давления в откачиваемом объеме.

3) Два дренажных трубопровода. Трубопроводы подсоединены одним концом к выходам эжекторов. Другой конец трубопровода закрыт самооткрывающейся заглушкой, предназначенной для предотвращения попадания атмосферных осадков внутрь трубопровода. Трубопроводы подгоняются и крепятся по месту.

4) Линия газообразного азота предназначена для подачи газообразного азота на эжекторы для обеспечения их работы (вакуумирования). Линия состоит из:

- входного вентиля, предназначенного для подачи газообразного азота на пневмопульт;

- дренажного вентиля;

- пневмоклапана, предназначенного для дистанционной подачи газообразного азота на эжекторы;

- манометра, предназначенного для контроля давления газа, поступающего на эжекторы.

5) Линия управляющего воздуха предназначена для подачи управляющего воздуха давлением (47 ± 5) кгс/см² на пневмоэлектроклапан двойного действия с целью управления клапаном (открыть, закрыть)

Линия управляющего воздуха состоит:

- входного вентиля, предназначенного для подачи управляющего давления на пневмопульт;

- дренажного вентиля;

- пневмоклапана двойного действия пневмоэлектроклапан двойного действия;

- манометра, предназначенного для контроля давления управляющего воздуха.

Вся арматура, эжекторы, манометры, входы и выходы смонтированы в отдельном пневмопульте. Пневмопульт закрыт панелями.

4.1.5 Система имитаций солнечного излучения

Система имитаций солнечного излучения необходима проверки реакции объекта испытания на воздействия солнечного теплового потока. В качестве источника используются керамические нагреватели ИК излучения.

Техническая характеристика:

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

Керамические нагреватели передают энергию электромагнитными волнами. Спектр этого излучения простирается снаружи освещения, видимого человеческим глазом в диапазоне длины волны от 0,7 [м] до 80 [м].

4.2 Работа участка вакуумных испытаний КА

Для проведения испытаний изделия осуществляются следующие операции:

- 1) включается питание системы контроля и управления;
- 2) системы вакуумирования, азотоснабжения, разгерметизации и зарядки сжатыми газами приводятся в рабочее состояние;
- 3) проводится разгерметизация камеры;
- 4) крышка камеры с тележкой перемещается с помощью буксира до грузочного устройства;
- 5) изделие устанавливается на тележку;
- 6) производится обвязка изделия и работа с системой зарядки сжатыми газами в соответствии с требованиями разработчика изделия;
- 7) изделие подсоединяется к системе зарядки сжатыми газами;
- 8) крышка с тележкой с изделием с помощью буксира закатывается в камеру;
- 9) крышка камеры придвигается к фланцу и прижимается к нему пневмозажимами;
- 10) камера вакуумируется до рабочего давления;

11) испытания изделия проводятся в соответствии с требованиями инструкции разработчика изделия.

После окончания испытания комплекс приводится в исходное положение до очередного испытания.

5 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

5.1 Общие положения по правилам и мерам безопасности при работе на вакуумной установке

Эксплуатирующий персонал, участвующий в работах, должен пройти медицинское освидетельствование и иметь удостоверение на право работы с закрепленным оборудованием.

К работам на установке допускаются лица, твердо знающие и строго соблюдающие:

- 1) устройство, работу и правила эксплуатации оборудования установки и комплектующих её изделий;
- 2) правила по технике безопасности;
- 3) правила пожарной безопасности;
- 4) правила электробезопасности;
- 5) правила по технике безопасности, изложенные в специальных инструкциях.

При выполнении работ необходимо быть внимательным и применять только соответствующий безопасной работе инструмент и приспособления.

Затяжку болтов, винтов и гаек производить с помощью штатных инструментов без дополнительных рычагов и приспособлений.

Все регламентные работы, работы по замене оборудования, выявлению и устранению возможных неисправностей разрешается производить при допустимой (не более 81 %) объемной доле азота в воздухе помещения. Объемная доля кислорода в окружающем воздухе и откачиваемых газах должна быть не более 28%.

При работе с жидким азотом необходимо помнить, что:

- 1) жидкий азот относится к низкокипящим жидкостям. При атмосферном давлении температура жидкого азота равна минус 196 °С;
- 2) попадание жидкого азота на тело человека вызывает тяжелое обморожение;

3) все работы, связанные с использованием жидкого азота необходимо выполнять в спецодежде (комбинезон, рукавицы, защитные очки);

4) при обнаружении на изделиях, предназначенных для использования жидкого азота, неисправностей (механические повреждения, появление инея на коже, большое испарение) – пользоваться ими запрещается;

5) при поражении жидким или газообразным азотом необходимо оказание помощи пострадавшему.

Первая помощь должна быть возможно более ранней и проводиться в порядке само- и взаимопомощи с немедленным вызовом медицинского работника.

При поражении газообразным азотом необходимо вынести пострадавшего из зоны поражения в теплое, чистое помещение или на свежий воздух; освободить от затрудняющей дыхание одежды и организовать вдыхание 60%-ной кислородно-воздушной смеси со скоростью 8-10 л/мин по 30 минут с интервалом по 10 минут; при явлениях слезотечения, чихания, кашля промыть глаза и прополоскать горло теплой водой или теплым раствором 2%-ной борной кислоты.

При эксплуатации установки допускается использование только штатного оборудования, предусмотренного технической документацией на установку.

Включать механические насосы допускается только при наличии исправного ограждения и посторонних предметов на шкивах или приводных ремнях.

5.2 Меры безопасности при испытаниях КА в вакуумной камере

Все работы выполнять в строгом соответствии с требованиями ЭД.

При работе на вакуумной камере запрещается:

– разбирать пневмомагистрали при наличии в них давления или разрежения не соответствующих атмосферному давлению;

– вскрывать вакуумную камеру до выравнивания в ней давления, равного атмосферному;

– использовать пневматические рукава с недопустимыми радиусами изгибов;

– находиться в непосредственной близости к пневмомагистралям в момент подачи давления.

5.3 Меры безопасности при работе со сжатыми газами

При работе со сжатыми газами запрещается:

- 1) устранять неисправности составных частей и трубопроводов, находящихся под давлением;
- 2) превышать рабочее давление;
- 3) пользоваться средствами измерений давления с испорченной шкалой или просроченными сроками поверки;
- 4) пользоваться арматурой, ресурс которой выработан;
- 5) снимать заглушки со штуцеров арматуры и трубопроводов, находящихся под давлением;
- 6) устанавливать изогнутые или скрученные вокруг своей оси металлорукава;
- 7) использовать баллоны, у которых истек срок периодического технического освидетельствования, отсутствуют установочные клейма, поврежден корпус (трещины, заметная коррозия, изменение формы).

6 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

6.1 Себестоимость проектирования вакуумной установки

В качестве конечного результата дипломного проектирования рассматривается прототип системы.

Основными источниками затрат при работе над темой как части этапа проектирования являются капитальные предпроизводственные затраты, которые в свою очередь могут быть учтены и минимизированы.

В себестоимость проекта включаются все затраты, связанные с ее выполнением вне зависимости от источника ее финансирования. Вычисление 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.

Таблица 9 – Затраты на расходные материалы

№ п/п	Наименование материала	Кол-во	Цена, руб.	Сумма затрат, в руб.
1	Канцелярские товары	-	-	1000
2	Лицензионная версия MS Office 2010	1 шт.	2 214,08	2 214,08
3	AutoCAD 2012	1 шт.	8 555,6	8 555,6
4	Бумага для офисной техники	1 пачка	150,00	150,0
5	Тонер для принтера	1 шт.	150,00	150,0
Итого:				12 069,68

Таблица 10 – Основная заработная плата разработчиков

Наименование этапов	Исполнители	Трудо-емкость, чел/дн	Трудо-емкость, чел/мес*	Зарплата в мес., руб.	Затраты по зарплате, руб.
Разработка технического задания	Инженер	3	0,14	5 500,00	770

Продолжение таблицы 10

Ознакомление с существующими методами вакуумных испытаний	Инженер	3	0,14	5 500,00	770
Разработка эскизного проекта	Инженер	7	0,32	5 500,00	1 760
Консультации с руководителем проекта	Руководитель	3	0,14	11 890,00	1 664,6
Разработка геометрических моделей и чертежей	Инженер	12	0,55	5 500,00	3 025
Разработка маршрутной и операционной технологии изготовления изделия	Инженер	7	0,32	5 500,00	1 760
Подготовка технической документации	Инженер	4	0,18	5 500,00	990
Сдача результатов проектирования	Инженер	1	0,05	5 500,00	275
Итого:					11 014,6

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

$$\Phi_{\text{д}} = 20/100 \cdot \Phi_{\text{ос}}, \quad (119)$$

где $\Phi_{\text{д}}$ – дополнительная заработная плата разработчиков, руб.;

$\Phi_{\text{ос}}$ – фонд основной заработной платы разработчиков, руб.

Фонд основной заработной платы разработчиков составляет 9 912,1 руб.

В соответствии с формулой (119) дополнительная заработная плата разработчиков составляет:

$$\Phi_{\text{д}} = 0,2 \cdot 11\,014,6 = 2\,202,92 \text{ руб.}$$

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

$$\text{СВ} = 30,2/100 \cdot (\Phi_{\text{ос}} + \Phi_{\text{д}}), \quad (120)$$

где СВ – страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования.

Таким образом, в соответствии с формулой (120), размер отчислений составит:

$$СВ = (11\,014,6 + 2\,202,92) \cdot 0,302 = 3\,991,69 \text{ руб.}$$

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

$$Н_p = 180/100 \cdot \Phi_{oc}, \quad (121)$$

где $Н_p$ – накладные расходы.

В соответствии с формулой (121):

$$Н_p = 1,8 \cdot 11\,014,6 = 19\,826,28 \text{ руб.}$$

Прочие расходы включают стоимость машинного времени на создание, отладку и подготовку технической документации и определяются по следующей формуле:

$$З_{пр} = N \cdot C_{мч} \cdot K_{загр}, \quad (122)$$

где $З_{пр}$ – прочие расходы;

N – количество часов, необходимых на создание, отладку и подготовку технической документации $N = 33 \cdot 8 = 264$ ч;

$C_{мч}$ – стоимость машино-часа, $C_{мч} = 50$ руб.;

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

Тогда в соответствии с формулой (122):

$$З_{пр} = 264 \cdot 50 \cdot 0,7 = 9\,240 \text{ руб.}$$

Себестоимость проектирования вакуумной установки представлена в таблице 11.

Таблица 11 – Себестоимость проектирования вакуумной установки

№ п/п	Наименование статей расходов	Затраты, руб.
1	Расходные материалы	12 069,86
2	Основная заработная плата разработчиков	11 014,6
3	Дополнительная заработная плата разработчиков	2 202,92
4	Страховые взносы в пенсионный фонд и фонды социального страхования	3 991,69
5	Накладные расходы	19 826,28
6	Прочие расходы	9 240
	ИТОГО	58 345,35

Необходимые затраты для создания опытного образца приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Расходы на приобретение комплектующих изделий

№ п/п	Наименование изделия	Кол-во	Цена, руб.	Сумма, руб.
1	Вакуумная камера	1	36 948 840	36 948 840
2	Вакуумный насос НВЗ-500	1	550 000	550 000
3	Вакуумный насос 2ДВН-1500	1	380 000	380 000
4	Вакуумный насос ТМН-5000	1	976 000	976 000
5	Течеискатель ТИ1-30	1	1 072 000	1 072 000
6	Запорная арматура ЗВЭ-630	2	45 600	91 200
7	Запорная арматура ЗВЭ-400	4	33 500	134 000
8	Ловушка ЛАФ-160	2	145 000	290 000
9	Вакуумметр ВДГ-1	2	36 800	73 600
10	Вакуумметр ВТСО-1	2	42 300	84 600
11	Вакуумметр ВМБ-14	3	30 000	90 000
12	Вакуумметр ВИ-14	3	53 028	159 084
13	Трубопровод	1	372 000	1 354 000
	ИТОГО			42 203 324

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

Таблица 13 – Затраты на основные материалы

№ п/п	Наименование материала	Объем, л.	Цена, л./руб.	Сумма затрат, в руб.
1	Жидкий гелий	1000	690,3	690 300
2	Жидкий азот	1000	171,73	171 730
3	Сжатый воздух	1000	24,5	24 500
4	Дизельное топливо	1000	25	25 000
5	Вакуумное масло ВМ-4	300	50	15 000
6	Гидравлическая жидкость	300	44	13 200
	ИТОГО			939 730

6.2 Оценка косвенного экономического эффекта

Космические аппараты, запущенные в космическое пространство, должны сохранять работоспособность при экстремально низких давлениях и экстремальных температурах цикла. В связи с необходимостью повышения надежности и увеличения срока эксплуатации создаваемых космических аппаратов в космическом пространстве необходимы наземные вакуумные испытания. Вакуумные испытания проводятся в вакуумных установках.

С внедрением данной вакуумной установки можно получить следующие выгоды:

- экономию затрат на проведение испытаний;
- экономию на производстве космических аппаратов.

В данной части выпускной квалификационной работы были рассчитаны себестоимость проектирования вакуумной установки, которая составила 58 345,35 руб. и необходимые расходы для создания опытного образца, которая составила 42 203 324 руб. А также оценен косвенный экономический эффект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была спроектирована вакуумная промышленная установка большого объёма для испытания крупногабаритных объектов.

В основной части работы был произведен расчет величины потока газа, поступающих в вакуумную систему через материал и неплотности соединений. Исходя из результатов данного расчета, были выбраны схема вакуумной системы и вакуумные насосы.

Основным насосом был выбран криогенный насос, так как при работе такой тип насосов создает «стерильный» вакуум, имеет высокую надежность и быстроту откачки паров воды и газов с высокой молекулярной массой. Также при эксплуатации у них отсутствуют вибрации и шумы. Однако для запуска криогенных насосов необходима установка форвакуумной системы, которая понижает давления до необходимого.

Исходя из быстроты действия насосов, были определены конструктивные размеры трубопроводов и подобрана необходимая вакуумная арматура.

Также в ходе работы был выполнен расчет на прочность основных элементов камеры в рабочих условиях в результате которого было определено, что все элементы выдерживают необходимые нагрузки.

В разделе «Безопасность жизнедеятельности» были рассмотрены меры безопасности при работе на вакуумной установке, при испытаниях КА в вакуумной камере, при работе со сжатыми газами и при работе с жидким азотом.

В экономической части работы были рассчитаны себестоимость проектирования вакуумной установки, которая составила 58 345,35 руб. и расходы на приобретение комплектующих изделий, необходимых для создания опытного образца, которая составила 42 203 324 руб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нусинов, М. Д. Имитационные установки / М. Д. Нусинов. – М.: Машиностроение, 1980. – 24 с.;
2. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника: Учебное пособие для вузов по специальности «Вакуумная техника» / Л. Н. Розанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 320 с.;
3. Фролов, Е. С. Вакуумная техника: Справочник / Е. С. Фролов, В. Е. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.;
4. Демихов, К. Е. Вакуумная техника: Справочник / К. Е. Демихов, Ю. В. Панфилов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2009. – 590 с.;
5. Курашов, В. И. Вакуумная техника средства откачки, их выбор и применение: Учебное пособие / В. И. Курашов, М. Г. Фомина. – КГТУ, 1997. – 52 с.;
6. Фролов, Е. С. Механические вакуумные насосы / Е. С. Фролов, В. И. Автономова. – М. Машиностроение, 1989. – 288 с.;
7. Саксаганский, Г. Л. Современные турбомолекулярные и электрофизические насосы / Г. Л. Саксаганский. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1981 – 95 с.;
8. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – М.: «Химия», 1976 – 512 с.;
9. Архаров, А. М. Теория и расчет криогенных систем / А. М. Архаров, И. В. Марфенина, Е. И. Микулин. – М.: Машиностроение, 1978. – 328 с.;
10. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – М.: Гостехиздат, 1965. – 416 с.;
11. БТ-142-82 «Инструкция по технике безопасности при работе с баллонами со сжатыми, сжиженными и растворенными газами» – М.: НПО «Наука»;
12. Разновидности вакуумного оборудования [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eastvacuum.ru/news/raznovidnosti-vakuumnogo-oborudovaniya-101.html>;

13. Нусинов, М. Д. Космический вакуум и надежность космической техники / М. Д. Нусимов. – М.: Знание, 1986. – 64 с.;
14. Королев, Б. М. Основы вакуумной техники / Б. М. Королев, В. И. Кузнецов, А. И. Пипко. – М.: Энергия, 1971. – 392 с.;
15. Кузнецов, В. И. Теория и расчет криогенных систем / В. И. Кузнецов, И. В. Марфенина, Е. И. Микулин. – М.: Машиностроение, 1978. – 347 с.;
16. Мелков, М. П. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М. П. Мелков. – М.: Энергия, 1973. – 234 с.;
17. Микулин, Е. И. Техника низких температур / Е. И. Микулин. – М.: Наука, 1980. – 356 с.;
18. Мучин П. В. Безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие для вузов / П. В. Мучин. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 276 с.;
19. Мучин, П. В. Охрана труда в организации: Учебное пособие для руководителей и специалистов / П. В. Мучин. – Новосибирск: СГГА, 2005. – 120 с.