

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Факультет автоматики и электроники

Кафедра электрофизических установок

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

**Вакуумная система**

Исполнитель / \_\_\_\_\_ /

Группа

Преподаватель / \_\_\_\_\_ /

## АННОТАЦИЯ

В данной работе представлен расчет вакуумной системы. Объем рабочей камеры -  $0.5 \text{ м}^3$  Предельное разрежение в камере -  $10^{-4} \text{ Па}$ . Диаметр съемной крышки на резиновом уплотнении - 400 мм. Выполнены подбор и согласование средств откачки, элементов вакуумной системы, конструкционных материалов и расчёт режимов откачки. Разработан эскиз загрузочного фланца на резиновом уплотнении.

### Ключевые слова

Вакуум, вакуумная техника, откачка, вакуумные конструкционные материалы, расчёт вакуумных систем.

### Термины и определения

**Вакуум** - состояние газа при давлениях более низких, чем атмосферное.

**Вакуумной системой** называется совокупность взаимосвязанных устройств для получения и поддержания вакуума, приборов для вакуумных измерений, а также откачиваемых объемов (камер) и связывающих их вакуумных трубопроводов.

**Откачка** вакуумной системы заключается в уменьшении молекулярной концентрации или количества молекул (снижении давления газа) до уровня, обеспечивающего проведение физических исследований или вакуумных технологических процессов.

Уменьшение количества молекул газа в системе осуществляется с помощью устройств для получения и поддержания вакуума (средств откачки) - **вакуумных насосов**, удаляющих или поглощающих газ из вакуумной системы

**Газовыделение** - выделение газа из материала в объем вакуумной системы

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ .....	3
1.1. Исходные параметры системы .....	3
1.2. Конструкция вакуумной камеры .....	3
1.3. Конструкционные материалы .....	4
2. ГАЗОВЫЕ НАГРУЗКИ .....	4
2.1. Определение суммарного газового потока .....	4
2.2. Расчет потока газовыделения .....	4
2.3. Расчет потока вследствие проницаемости через материалы .....	5
2.4. Расчет потока газа через течи вакуумной камеры .....	6
2.5. Расчет суммарного потока .....	6
3. ВЫБОР НАСОСОВ .....	7
3.1. Выбор высоковакуумного насоса .....	7
3.2. Выбор низковакуумного насоса .....	8
3.3. Согласование насосов .....	8
3.4. Схема вакуумной системы .....	9
4. ПРОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ .....	10
4.1. Расчёт высоковакуумного тракта .....	10
4.2. Расчёт времени предварительной откачки .....	12
5. КРИВЫЕ ОТКАЧКИ .....	15
5.1. Предварительная откачка .....	15
5.2. Высоковакуумная откачка .....	16
6. ЭСКИЗ ЗАГРУЗОЧНОГО ФЛАНЦА НА РЕЗИНОВОМ УПЛОТНЕНИИ .....	17
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	18
ЛИТЕРАТУРА .....	19

## ВВЕДЕНИЕ

Получение и поддержание вакуума – сложная техническая задача, для решения которой необходима разработка и построение вакуумной системы. Для каждой отдельной экспериментальной или производственной задачи необходимо производить конструирование своей вакуумной системы, поскольку именно условия данной задачи и определяют ее конструкцию. [3]

### 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

#### 1.1. Исходные параметры системы

Проектировочный расчет выполняется при разработке новых вакуумных машин и установок. Целью такого расчета является выбор откачного оборудования, арматуры и определение размеров соединительных трубопроводов из условия обеспечения заданного рабочего давления в вакуумной камере. Основные технологические процессы в вакуумной камере осуществляются в стационарном режиме работы вакуумной установки. Для этого режима течения газа характерно постоянное или медленно меняющееся технологическое газовыделение.

Выберем для проектировочного расчета вакуумную систему установки, обеспечивающую возможность получения высокого вакуума.

Параметры вакуумной системы, заданные на начальном этапе ее проектирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные параметры системы

Объем рабочей камеры, м <sup>3</sup>	0,5
Предельное разрежение, Па	10 <sup>-4</sup>
Диаметр съемной крышки, мм	400

#### 1.2. Конструкция вакуумной камеры

Форма рабочей камеры – цилиндрическая. Примем высоту камеры равной диаметру, тогда рассчитаем радиус, площадь внутренней поверхности камеры.

Объем вакуумной камеры

$$V = \pi R^2 h, h = 2R$$

$$V = 2\pi R^3 \Rightarrow R = \sqrt[3]{\frac{V}{2\pi}} = 0.43 \text{ м}$$

где  $R$  – радиус вакуумной камеры, а  $h$  – ее длина.

Площадь внутренней поверхности вакуумной камеры:

$$A = 2\pi R^2 + 2\pi R h = 2\pi R^2 + 4\pi R^2 = 6\pi R^2 = 3.48 \text{ м}^2$$

### 1.3. Конструкционные материалы

Исходя из размеров вакуумной камеры, необходимо рассчитать газовые нагрузки. Конструкционными материалами являются: нержавеющая сталь 12X18H10T, уплотнитель из резины 7889, стекло С89-2. Параметры материалов представлены в таблице 2. [1, 2]

Таблица 2. Параметры материалов

	12X18H10T	9024	С89-2
Скорость газовыделения $q_0$ , $\frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$	$3.25 \cdot 10^{-3}$	$10^{-2}$	-
Проницаемость по: $N_2$ $O_2$ $He$ $\frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$	- - -	$1 \cdot 10^{-11}$ $0.735 \cdot 10^{-11}$ -	- - $10^{-18}$

## 2. ГАЗОВЫЕ НАГРУЗКИ

### 2.1. Определение суммарного газового потока

Стационарный газовый поток, откачиваемый насосом, во время работы вакуумной установки имеет несколько составляющих:  $Q_{\Sigma} = Q_{\text{гв}} + Q_{\text{пр}} + Q_{\text{т}}$ , где

$Q_{\text{гв}}$  - газовый поток, обусловленный тепловым газовыделением материалов с их поверхности

$Q_{\text{пр}}$  – газовый поток вследствие проницаемости через материалы

$Q_{\text{т}}$  - поток газа через течи вакуумной камеры

### 2.2. Расчет потока газовыделения

Общая формула для определения потока газовыделения:

$$Q_{\text{гв}} = \sum_i A_i q_i,$$

где  $A_i$  – площадь поверхности

$q_i$  - удельная скорость поверхностного теплового газовыделения

Площадь поверхности резинового уплотнения съёмной крышки, толщиной  $h = 6$  мм

$$A_{\text{кр}} = 2\pi R h = 2\pi \cdot 0.2 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 7.53 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Отсюда поток газовой выделения через резину будет равен:

$$Q_{\text{гв рез}} = 10^{-2} \cdot 7.53 \cdot 10^{-3} = 0.75 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$$

Удельное газовойделение для стали [2]

$$q(t) = \exp(A - Bt),$$

где  $q_0$  - начальное удельное газовойделение

$t$  – время откачки

$A$  и  $B$  – коэффициенты, которые для выбранной стали равны  $A = -3.467$ ,  
 $B = 4.25 \cdot 10^{-5}$

Тогда поток газовойделения через сталь равен:

$$Q_{\text{гв ст}} = 3.48 \cdot \exp(-3.467 - 4.25 \cdot 10^{-5} \cdot t) \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$$

Общий поток газовойделения с поверхности:  $Q_{\text{гв}} = Q_{\text{гв рез}} + Q_{\text{гв ст}} = 0.75 \cdot 10^{-4} + 3.48 \cdot \exp(-3.467 - 4.25 \cdot 10^{-5} \cdot t)$

При  $t = 1$ , поток равен:  $Q_{\text{гв}} = 3.87 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$

### 2.3. Расчет потока вследствие проницаемости через материалы

Количественная оценка процессов стационарной проницаемости газа через стенки вакуумной системы, изготовленные из различных материалов или имеющие различную толщину, может быть определена по формуле:

$$Q_{\text{пр}} = \sum_i K_{0i} \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{при}}}{jRT}\right) \cdot \frac{p_1^{1/j}}{h_i} \cdot A_i$$

где  $K_{0i}$  и  $E_{\text{при}}$  - соответственно константа проницаемости и теплота активации для материала  $i$ -й стенки вакуумной системы

$A_i$  и  $h_i$  – соответственно площадь и половина толщины -ой стенки

$p_1$  – давление на стенку

$j$  – число атомов в молекуле газа, проникающего через стенку

$T$  – абсолютная температура стенки

$R$  - универсальная газовая постоянная

Проницаемость через резиновое уплотнение будет основной составляющей данного газового потока.

Основные газы, проникающие через резину 9024:  $N_2$ ,  $O_2$  [1].

Тогда, газовый поток:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{N_2} + Q_{O_2}.$$

Для азота:  $Q_{N_2} = q' p_{N_2}^{1/j} \frac{A_{\text{рез}}}{h} = 10^{-11} \cdot 7.9 \cdot 10^4 \cdot 7.53 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{6 \cdot 10^{-3}} = 9.914 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$

$$p_{N_2}^{1/j} = 7.9 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Для кислорода:  $Q_{O_2} = q' p_{O_2}^{1/j} \frac{A_{\text{рез}}}{h} = 0.735 \cdot 10^{-11} \cdot 2.12 \cdot 10^4 \cdot 7.53 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{6 \cdot 10^{-3}} = 1.956 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$

$$p_{O_2}^{1/j} = 2.12 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Суммарный газовый поток:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{N_2} + Q_{O_2} = 11.87 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$$

## 2.4. Расчет потока газа через течи вакуумной камеры

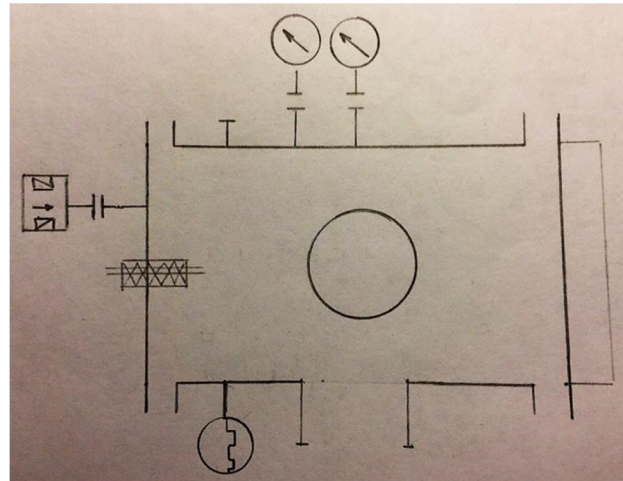


Рис.1. Схема вакуумной камеры

Для учёта потока течи используется формула:  $Q_T = q_T N$ ,

где  $q_T = 7 \cdot 10^{-13} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$  - чувствительность течеискателя (ПТИ-10) [2]

$N = 13$  - количество соединений с вакуумной камерой

Тогда поток течи равен:  $Q_T = 7 \cdot 10^{-13} \cdot 13 = 91 \cdot 10^{-13} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$

## 2.5. Расчет суммарного потока

Суммарная газовая нагрузка:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{гв}} + Q_{\text{пр}} + Q_T = 0.75 \cdot 10^{-4} + 3.48 \cdot \exp(3.467 - 4.25 \cdot 10^{-5} \cdot t) + 11.87 \cdot 10^{-7} + 91 \cdot 10^{-13} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$$

При  $t = 1$ ,  $Q_{\Sigma} = 3.883 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$

Рассмотрим зависимость газовых нагрузок в камере от времени. С учётом площади камеры и всех газовых нагрузок, зависимость суммарной газовой нагрузки в камере от времени имеет следующий вид:

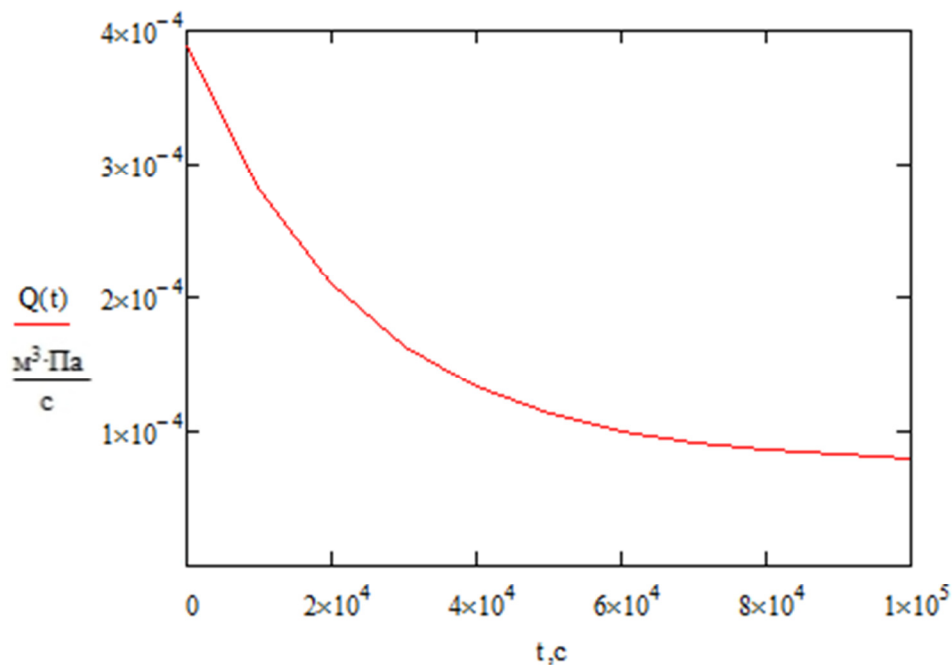


Рис.2. График зависимости суммарного потока от времени  $Q_{\Sigma}(t)$

Рабочее давление  $p_{\text{раб}} \approx 10^{-3}$

Вычислим эффективную быстроту действия:  $S_{\text{эф}} = \frac{Q_{\Sigma}}{p_{\text{раб}}} = 0.38 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$

### 3. ВЫБОР НАСОСОВ

#### 3.1. Выбор высоковакуумного насоса

В соответствии с требованиями задания предельное разрежение в камере должно быть  $10^{-4}$  Па и объем рабочей камеры равен  $0.5 \text{ м}^3$ . Для высоковакуумной откачки, исходя из этих условий, выбираем паромасляный диффузионный насос Н-160/700.

Таблица 3. Параметры Н-160/700

Основные характеристики	Значение
Диапазон рабочих давлений, Па	$1 \cdot 10^{-4} \dots 3$
Быстрота откачки воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$	0.64
Предельное остаточное давление, Па	$7 \cdot 10^{-5}$
Наибольшее выпускное давление, Па	33
Диаметр впускного патрубка, мм	160
Диаметр выпускного патрубка, мм	32



### 3.2. Выбор низковакуумного насоса

Предварительно выбираем низковакуумный насос. Его выберем из условий:

1) Давление запуска высоковакуумного насоса должно быть в диапазоне рабочих давлений низковакуумного насоса

2) Примерное время откачки до запуска ВВ насоса  $\approx 10 \div 20$  мин

Т.к. необходимо получить давление 33 Па (для запуска Н-160/700), то следует рассчитать предварительную быстроту действия насоса по формуле  $S = \frac{kQ}{P}$ , где  $k$  – коэффициент использования насоса ( $k = 1.4$ );  $Q$  – суммарная газовая нагрузка,  $P$  – требуемое давление. Таким образом, получается, что:

$$S = \frac{kQ}{P} = \frac{1.4 \cdot 3.883 \cdot 10^{-4}}{33 \cdot 10^{-2}} = 1.647 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Выбираем ближайший с большей быстротой откачки, а также наиболее подходящий по предельному остаточному давлению для предварительного разряжения, необходимого для запуска высоковакуумного насоса. Выбираем подходящий насос пластинчато-роторный 2НВР-5ДМ.

Таблица 4. Параметры 2НВР-5ДМ

Основные характеристики	Значение
Диапазон рабочих давлений, Па	$5 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^5$
Быстрота откачки воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$	0.005
Предельное остаточное давление, Па	$1 \cdot 10^{-2}$
Диаметр впускного патрубка, мм	16

Рассмотрим возможность применения низковакуумного насоса для предварительной откачки. Эффективная быстрота откачки НВН будет составлять:

$$S_{\text{эф. нв}} = \frac{S_{\text{н}}}{k} = \frac{0.005}{1.4} = 3.571 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Оценочное время до запуска высоковакуумного насоса (при коэффициенте использования насоса  $k = 1.4$ )  $t = \frac{V}{S_{\text{эф. нв}}} \ln \left( \frac{P_0}{P_{\text{зап}}} \right) = \frac{0.5}{3.571 \cdot 10^{-3}} \ln \left( \frac{10^5}{5} \right) = 20$  мин.

### 3.3. Согласование насосов

При согласовании насосов необходимо рассмотреть режим запуска. Давление на входе в вспомогательный насос должно быть меньше давления  $p_{\text{наиб}}$  на выходе из высоковакуумного насоса, так как  $p_{\text{наиб}}$  является наибольшим давлением на выходе, при котором ещё работает высоковакуумный насос, но при превышении которого высоковакуумный насос прекращает работу.

Таким образом, вспомогательный насос должен быть способен не только удалять в единицу времени определённое количество газов, поступающих из основного насоса, но

и поддерживать необходимое выпускное давление (равное или меньшее  $p_{\text{наиб}}$ ) на его выходе.[4]

Максимальное давление на выходе ВВН:  $p_{\text{наиб}} = 33 \text{ Па}$ . Давление запуска:  $p_{\text{зап}} = \frac{Q_{\Sigma}}{S_{\text{ВВН}}} = \frac{3.883 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}} = 0.078 \text{ Па}$

Поток, создаваемый ВВН равен:  $Q_{\text{зап}} = S_{\text{ВВН}} p_{\text{зап}} = 0.64 \cdot 0.08 = 0.05 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$

Для того, чтобы насос справился с данным потоком  $p_{\text{вх}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{S_{\text{НВН}}} < p_{\text{наиб}}$

$$p_{\text{вх}} = \frac{Q_{\text{зап}}}{S_{\text{НВН}}} = \frac{0.05}{5 \cdot 10^{-3}} = 10 \text{ Па}$$

$p_{\text{вх}} < p_{\text{наиб}}$ , отсюда следует, что насосы согласованы

### 3.4. Схема вакуумной системы

Схема вакуумной системы изображена на рисунке 3. Описание элементов вакуумной системы приведены в таблице 5.

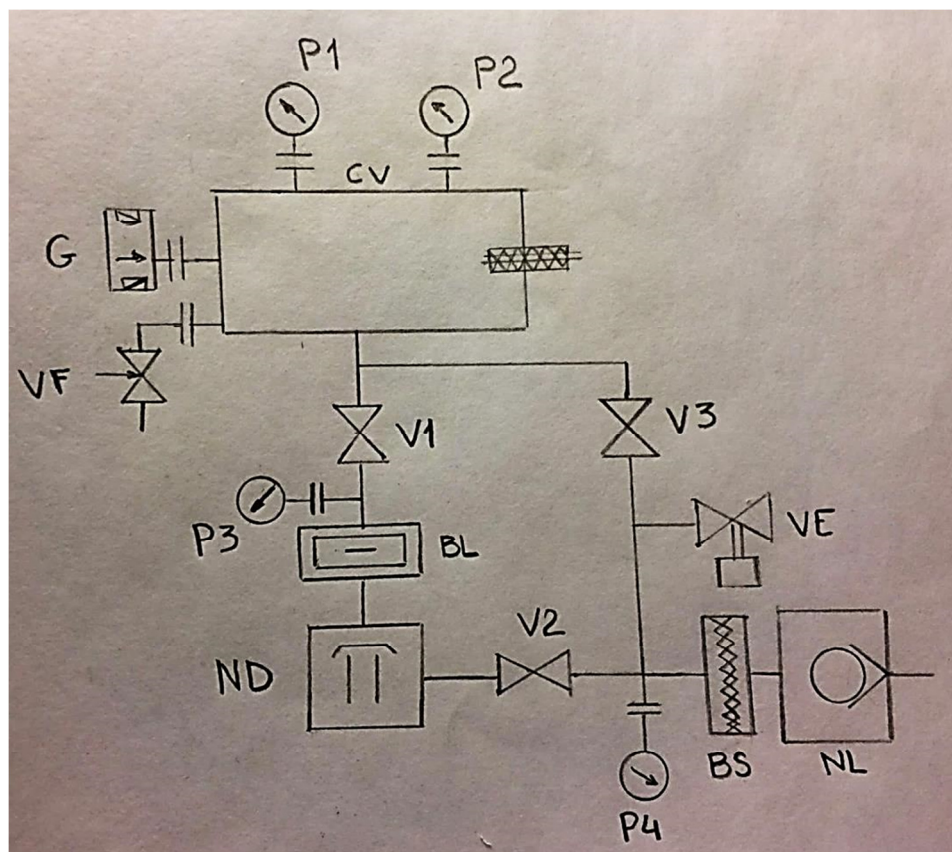


Рис.3 Схема вакуумной системы

Таблица 5. Описание вакуумной системы

Обозначение	Наименование
CV	Вакуумная камера
P1...P4	Манометрический преобразователь
G	Течеискатель
VF	Натекатель
V1...V3	Клапан
BL	Заливная ловушка
ND	Диффузионный насос
BS	Сорбционная ловушка
VE	Клапан с электромагнитным приводом
NL	Вращательный насос

## 4. ПРОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

### 4.1. Расчёт высоковакуумного тракта

Задачей проверочного расчета является определение распределения давления в известной вакуумной системе. Проверочный расчет осуществляется для определения характеристик существующих вакуумных систем или уточнения проектировочных расчетов. [2]

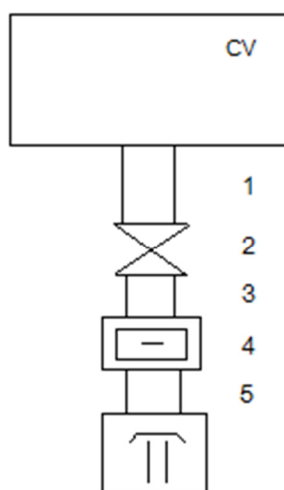


Рис. 4. Высоковакуумный тракт

В каждую из ступеней откачки вакуумной системы помимо соответствующего насоса входит трубопровод, соединяющий насос с откачиваемым объемом или с насосом более высоковакуумной ступени. Трубопровод, как и любой элемент вакуумной системы, характеризуется пропускной способностью или проводимостью  $U$ , зависящей от его геометрических размеров и являющейся коэффициентом пропорциональности между потоком и разностью давлений на концах элемента.

Для трубопровода пропускную способность в достаточно широком диапазоне давлений можно определять по формуле (уравнение Кнудсена):  $U = U_B + U_M \cdot K$ , где  $U_B$  и  $U_M$  - проводимости в вязкостном и молекулярном режимах течения газа соответственно;  $K$  - коэффициент, зависящий от среднего давления в трубопроводе. Соответствующие выражения проводимостей для круглого трубопровода длиной  $L$  и диаметра  $d$  в азотном эквиваленте равны [3]:

$$U_B = 1.36 \cdot 10^3 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot p_{cp}; \quad U_M = 121 \cdot \frac{d^3}{l}; \quad K = \left( \frac{1+1.9 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{cp}}{1+2.35 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{cp}} \right); \quad p_{cp} = \frac{p_{вх} + p_{вых}}{2}$$

**Участок №1:** Диаметр высоковакуумного тракта берем равным диаметру впускного патрубка  $d = 160$  мм. На первом участке длина трубопровода равна:  $l_1 = 0.07$  м. Тогда проводимость на этом участке равна:

$$U_{тр1} = 121 \cdot \frac{d^3}{l_1} = 121 \cdot \frac{(160 \cdot 10^{-3})^3}{0.07} = 7.08 \frac{м^3}{с}$$

**Участок №2:** Учитывая диаметр первого участка, на втором участке будем использовать затвор ЗВЭ-160 с проводимостью:

$$U_3 = 3.34 \frac{м^3}{с}$$

**Участок №3:** На третьем участке длина трубопровода равна:  $l_3 = 0.08$  м. Тогда проводимость на этом участке равна:

$$U_{тр2} = 121 \cdot \frac{d^3}{l_3} = 121 \cdot \frac{(160 \cdot 10^{-3})^3}{0.08} = 6.195 \frac{м^3}{с}$$

**Участок №4:** Внешний диаметр ловушки  $d_{внеш} = 0.25$  м, внутренний диаметр ловушки  $d_{внут} = 0.1$  м, длина ловушки  $l_l = 0.25$  м.

Для цилиндрического трубопровода с коаксиальным расположением стержня проводимость вычисляется:

$$U_l = \frac{(d_{внеш} - d_{внут})^2 \cdot (d_{внеш} + d_{внут})^2}{l_l} = 3.812 \frac{м^3}{с}$$

**Участок №5:** На пятом участке длина трубопровода равна:  $l_5 = 0.08$  м. Тогда проводимость на этом участке равна:

$$U_{тр5} = 121 \cdot \frac{d^3}{l_5} = 121 \cdot \frac{(160 \cdot 10^{-3})^3}{0.08} = 6.195 \frac{м^3}{с}$$

Если в трубопровод включены какие-либо другие элементы вакуумной арматуры - клапаны, ловушки, то суммарная пропускная способность определяется по формуле:

$$\frac{1}{U_{\Sigma BB}} = \frac{1}{U_{\text{тр1}}} + \frac{1}{U_3} + \frac{1}{U_{\text{тр2}}} + \frac{1}{U_{\text{л}}} + \frac{1}{U_{\text{тр5}}} = 1.026 \frac{\text{с}}{\text{м}^3}$$

$$\text{Отсюда } U_{\Sigma BB} = 0.975 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Зная быстроту действия диффузионного насоса ( $S_H = 0.64 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ ), оценим эффективную быстроту действия:

$$\frac{1}{S_{\text{эф вв}}} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{U_{\Sigma BB}}; S_{\text{эф вв}} = \frac{S_H \cdot U_{\Sigma BB}}{S_H + U_{\Sigma BB}} \approx 0.38 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Из предыдущих расчетов:  $S_{\text{эф}} = 0.38 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ . Следовательно, высоковакуумный тракт выбран верно.

## 4.2. Расчёт времени предварительной откачки

Для откачки от атмосферного давления до 5 Па, откачку стоит разбить на 4 этапа:

1. Откачка в вязкостном режиме ( $10^5 - 40$  Па).
2. Откачка в молекулярно-вязкостном режиме (40-20 Па).
3. Откачка в молекулярно-вязкостном режиме (20-10 Па).
4. Откачка в молекулярно-вязкостном режиме (10-5 Па).

Определим границы откачки. Диаметр трубопровода берем равным диаметру входного патрубка низковакуумного насоса, т.е.  $d = 32$  мм. Длина трубопровода низковакуумной откачки  $l_{\text{НВ}} = 1.1$  м. Рассчитаем эффективную длину трубопровода, которая учитывает изгибы тракта. В данном случае имеется два изгиба:

$$l_{\text{эф}} = l_{\text{факт}} + l_{\text{экв}} = 1.1 + 2 \cdot 1.33 \cdot d = 1.185 \text{ м}$$

Длина свободного пробега вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{табл}}}{p} = \frac{6.7 \cdot 10^{-3}}{p}$$

Мерой разреженности газа является число Кнудсена, представляющее собой отношение средней длины свободного пробега молекул к характерному размеру течения:

$$k = \frac{\lambda}{p \cdot d}$$

$$\text{Отсюда } pd = \frac{\lambda}{k}$$

$$5 \cdot 10^{-3} \leq k \leq 0.33$$

Определим граничное давление для перехода из вязкостного в молекулярно-вязкостный режим:

$$pd \leq 1.33 \text{ Па} \cdot \text{м}$$

$$\text{Отсюда } p_1 = \frac{1,33}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 41 \text{ Па}$$

Граничное давление из молекулярно-вязкостного в молекулярный режим вычислим по формуле:

$$pd \leq 0,02 \text{ Па} \cdot \text{м},$$

$$\text{Отсюда } p_2 = \frac{0,02}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 0,6 \text{ Па}.$$

Вычислим полный объём, включающий в себя объём вакуумной камеры и объём ВВ тракта:

$$V_{\Sigma} = V_{\text{камеры}} + V_{\text{труб}} = 0,5 + 0,041 = 0,541 \text{ м}^3$$

Для расчёта проводимости трубопровода в молекулярно-вязкостном режиме используется формула:

$$U_{\text{МВ}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4 \cdot p_{\text{ср}}}{l} + 1,21 \cdot \frac{d^3 \cdot (1 + 1,9 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{\text{ср}})}{l \cdot (1 + 2,35 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{\text{ср}})}$$

Время для каждого участка откачки рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{V_{\Sigma}}{S_{\text{эф}}} \cdot \ln \left[ \frac{p_{\text{нач}} - \frac{Q}{S_{\text{эф}}}}{p_{\text{кон}} - \frac{Q}{S_{\text{эф}}}} \right]$$

где  $Q = 2,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$  – начальный газовый поток

**Этап №1 ( $10^5$  – 40 Па):** Время откачки для первого диапазона давлений равно:

$$t_1 = \frac{V}{S_{\text{эф нв}}} \ln \left( \frac{P_0}{P_{\text{зап}}} \right) = \frac{0,5}{4 \cdot 10^{-3}} \ln \left( \frac{10^5}{5} \right) = 20 \text{ мин}$$

Основное уравнение вакуумной техники:

$$\frac{1}{S_{\text{эф}}} = \frac{1}{U} + \frac{1}{S_{\text{н}}}$$

Из него видно, что если проводимость трубопровода значительно больше быстроты действия насоса, то быстрота откачки зависит только от насоса.

Т.к. проводимость для данного диапазона давлений намного больше, чем быстрота действия откачки насоса ( $S_{\text{н}} = 5 \frac{\text{л}}{\text{с}}$ ), то ее не учитываем.

**Этап №2 (40-20 Па):** Среднее давление для второго этапа равно:

$$p_{2\text{ср}} = \frac{40 + 20}{2} = 30 \text{ Па}$$

Проводимость для данного диапазона давлений равна:

$$U_2 = 1.36 \cdot 10^3 \frac{d^4 \cdot p_{2cp}}{l} + 1.21 \cdot \frac{d^3 \cdot (1 + 1.9 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{2cp})}{l \cdot (1 + 2.35 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{2cp})} = 0.036 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Эффективная быстрота откачки:

$$S_{2эф} = \frac{S_H \cdot U_2}{S_H + U_2} = 4.4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Время предварительной откачки:

$$t_2 = \frac{V_{\Sigma}}{S_{2эф}} \cdot \ln \left[ \frac{p_{нач2} - \frac{Q}{S_{2эф}}}{p_{кон2} - \frac{Q}{S_{2эф}}} \right] = \frac{0.541}{4.4 \cdot 10^{-3}} \cdot \ln \left[ \frac{40 - \frac{2.5 \cdot 10^{-4}}{4.4 \cdot 10^{-3}}}{20 - \frac{2.5 \cdot 10^{-4}}{4.4 \cdot 10^{-3}}} \right] = 35.5 \text{ с}$$

**Этап №3 (20-10 Па):** Среднее давление для второго этапа равно:

$$p_{3cp} = \frac{20 + 10}{2} = 15 \text{ Па}$$

Проводимость для данного диапазона давлений равна:

$$U_3 = 1.36 \cdot 10^3 \frac{d^4 \cdot p_{3cp}}{l} + 1.21 \cdot \frac{d^3 \cdot (1 + 1.9 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{3cp})}{l \cdot (1 + 2.35 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{3cp})} = 0.018 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Эффективная быстрота откачки:

$$S_{3эф} = \frac{S_H \cdot U_3}{S_H + U_3} = 3.917 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Время предварительной откачки:

$$t_3 = \frac{V_{\Sigma}}{S_{3эф}} \cdot \ln \left[ \frac{p_{нач3} - \frac{Q}{S_{3эф}}}{p_{кон3} - \frac{Q}{S_{3эф}}} \right] = \frac{0.541}{3.917 \cdot 10^{-3}} \cdot \ln \left[ \frac{20 - \frac{2.5 \cdot 10^{-4}}{3.917 \cdot 10^{-3}}}{10 - \frac{2.5 \cdot 10^{-4}}{3.917 \cdot 10^{-3}}} \right] = 96.186 \text{ с}$$

**Этап №4 (10-5 Па):** Среднее давление для второго этапа равно:

$$p_{4cp} = \frac{10 + 5}{2} = 7.5 \text{ Па}$$

Проводимость для данного диапазона давлений равна:

$$U_4 = 1.36 \cdot 10^3 \frac{d^4 \cdot p_{4cp}}{l} + 1.21 \cdot \frac{d^3 \cdot (1 + 1.9 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{4cp})}{l \cdot (1 + 2.35 \cdot 10^4 \cdot d \cdot p_{4cp})} = 9.052 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Эффективная быстрота откачки:

$$S_{4эф} = \frac{S_H \cdot U_4}{S_H + U_4} = 3.221 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Время предварительной откачки:

$$t_4 = \frac{V_{\Sigma}}{S_{4\text{эф}}} \cdot \ln \left[ \frac{p_{\text{нач4}} - \frac{Q}{S_{4\text{эф}}}}{p_{\text{кон4}} - \frac{Q}{S_{4\text{эф}}}} \right] = \frac{0.541}{3.221 \cdot 10^{-3}} \cdot \ln \left[ \frac{10 - \frac{2.5 \cdot 10^{-4}}{3.221 \cdot 10^{-3}}}{5 - \frac{2.5 \cdot 10^{-4}}{3.221 \cdot 10^{-3}}} \right] = 117.745 \text{ с}$$

Суммарное время предварительной откачки:

$$t_{\Sigma} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 23 \text{ мин}$$

## 5. КРИВЫЕ ОТКАЧКИ

### 5.1. Предварительная откачка

Суммарная газовая нагрузка:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{гв}} + Q_{\text{пр}} + Q_{\text{т}} = 0.75 \cdot 10^{-4} + 3.48 \cdot \exp(3.467 - 4.25 \cdot 10^{-5} \cdot t) + 11.87 \cdot 10^{-7} + 91 \cdot 10^{-13} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$$

Рабочее давление  $p_{\text{раб}} \approx 10^{-3}$

Эффективная быстрота действия насоса:

$$S_{\text{эф нв}} = 3.843 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

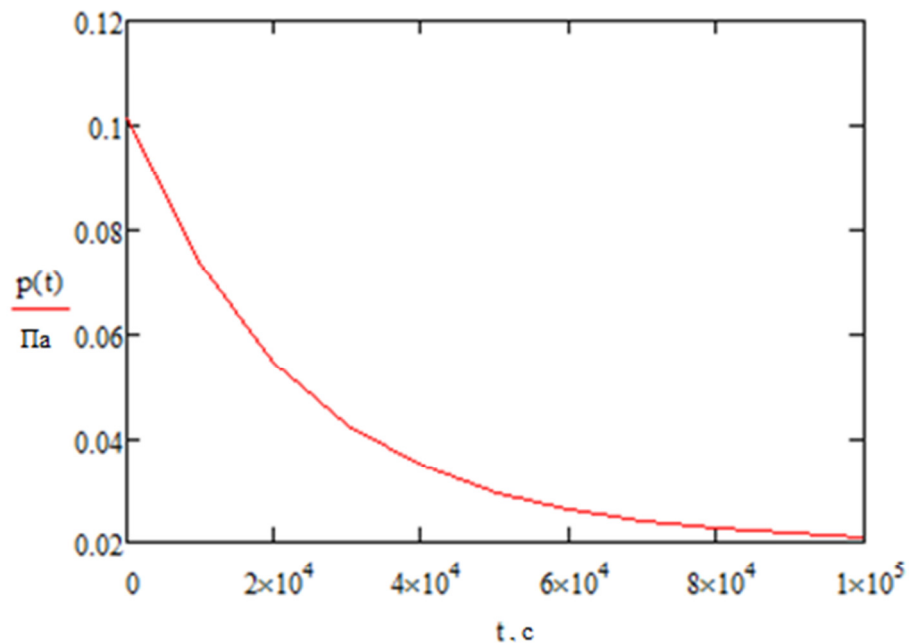


Рис. 5. Кривая предварительной откачки



## 5.2. Высоковакуумная откачка

Газовый поток:  $Q_{\Sigma} = Q_{\text{гв}} + Q_{\text{пр}} + Q_{\text{т}} = 0.75 \cdot 10^{-4} + 3.48 \cdot \exp(3.467 - 4.25 \cdot 10^{-5} \cdot t) + 11.87 \cdot 10^{-7} + 91 \cdot 10^{-13} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}$ .

Эффективная быстрота откачки насоса:  $S_{\text{эф}} = 0.38 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$

Начальное давление:  $p_0 = 33 \text{ Па}$

Объем вакуумной камеры:  $V = 0.5 \text{ м}^3$

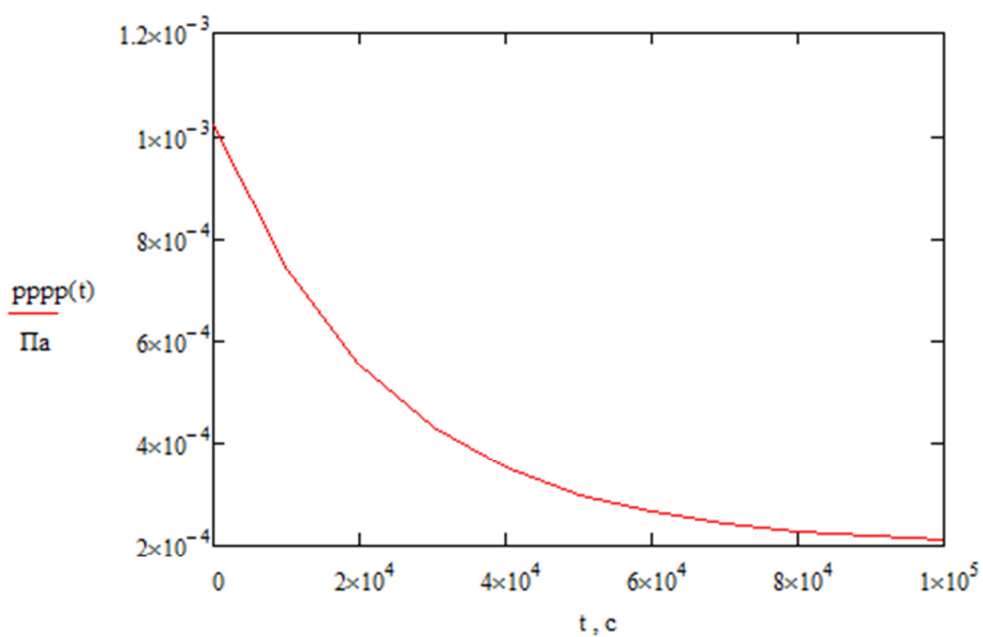


Рис. 6. Кривая высоковакуумной откачки

## 6. ЭСКИЗ ЗАГРУЗОЧНОГО ФЛАНЦА НА РЕЗИНОВОМ УПЛОТНЕНИИ

Эскиз загрузочного фланца представлен ниже на рисунке 7

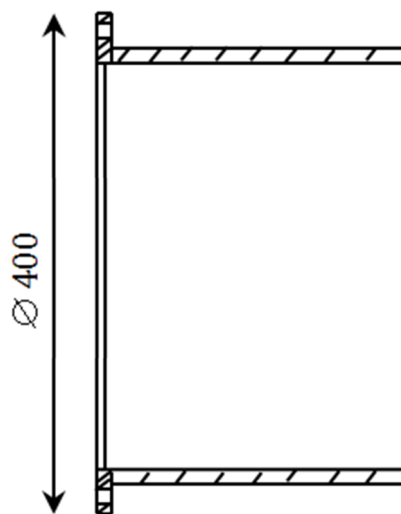


Рис.7. Эскиз загрузочного фланца

В данной системе он необходим для беспрепятственного доступа к вакуумной камере. При проектировании резинового уплотнения, используется резина 9024.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей курсовой работе была спроектирована вакуумная система для проведения вакуумных измерений.

Был осуществлен подбор и согласование средств откачки, элементов вакуумной системы, расчет параметров и режимов откачки.

В ходе расчетов было достигнуто требуемое рабочее давление в вакуумной камере с использованием пластинчато-роторного и диффузионного насосов. Время предварительной откачки низковакуумного насоса равно 23 минутам. Время работы диффузионного насоса 46 минут. Складывая эти величины, получаем время необходимое для достижения заданного давления – 69 минут,

## ЛИТЕРАТУРА

1. Е.С. Фролов, В.Е. Минайчева, Вакуумная техника (справочник), М., “Машиностроение”, 1992
2. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990.
3. Шатохин В.Л. Моделирование вакуумной системы//эфу.рф: кафедра электрофизических установок [http://xn--s1ab0a.xn--p1ai/vacuum/vacuum/virtual\\_labs/theory.pdf](http://xn--s1ab0a.xn--p1ai/vacuum/vacuum/virtual_labs/theory.pdf)
4. Пипко А.И., Пликовский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчёт вакуумных систем. М.: Энергия, 1979.