

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Т.И. Данилина

ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Учебно-методическое пособие по аудиторным практическим занятиям и
самостоятельной работе

Томск 2025

УДК 621.52
ББК 31.77
Д18

Одобрено на заседании кафедры физической электроники протокол №162 от 07.11.2024 года

Рецензент:

Смирнов Серафим Всеволодович,
доктор технических наук, профессор кафедры физической электроники ФГАОУ ВО
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Данилина, Тамара Ивановна
Д18 Основы вакуумной техники: Учебно-методическое пособие по аудиторным
практическим занятиям и самостоятельной работе / Т.И. Данилина - Томск: Томск. гос.
ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2025. – 19 с.

Пособие является руководством по выполнению студентами аудиторных практических занятий и
самостоятельной работы по дисциплине «Основы вакуумной техники».

Для студентов высших учебных заведений технических специальностей.

УДК 621.52
ББК 31.77

Данилина Тамара Ивановна
ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ
Учебно-методическое пособие по аудиторным практическим занятиям и
самостоятельной работе

© Данилина Т.И., 2025
© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2025

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Основные понятия и законы вакуумной техники	5
2. Определение основных параметров механических насосов.....	7
3. Расчет параметров диффузионных насосов	8
4. Расчет выбора вакуумных насосов для обеспечения заданного давления газа	9
5. Проектирование вакуумных установок и расчёт основных параметров.....	10
Задания для самостоятельной работы студентов.....	12
Варианты заданий для контрольной работы	13
Индивидуальные задания	16

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебно-методическое пособие предназначено для обучения студентов по дисциплине «Основы вакуумной техники» и включает в себя задания для аудиторных практических занятий, варианты контрольных работ и варианты индивидуальных заданий.

Первая контрольная работа охватывает материал следующих разделов:

- основные законы вакуумной техники;
- механические вакуумные насосы;
- паромасляные диффузионные насосы;
- физико-химические методы получения вакуума.

Итоговая контрольная работа предусмотрена по всем разделам лекционного курса.

Индивидуальные задания составлены по всем разделам лекционного курса, включая методы измерения вакуума, выбор вакуумных насосов, проверочный расчет вакуумных систем.

1. Основные понятия и законы вакуумной техники

Вакуумные насосы характеризуются следующими основными параметрами:

- быстротой действия S_n ;
- предельным давлением $p_{пр}$;
- давлением запуска $p_з$;
- наибольшим выпускным давлением $p_{вып}$.

Эффективная скорость откачки рабочего объема S_0 отличается от быстроты действия насоса, и при большой проводимости трубопровода U , соединяющего насос с объемом, будет максимальна, т.е. $S_0 \rightarrow S_n$. При этом коэффициент использования насоса будет максимальным, т.е. $K_n \rightarrow 1$. При малой проводимости трубопровода – $S_0 \rightarrow 0$ и $K_n \rightarrow 0$.

Предельное давление – это минимальное давление, которое устанавливается в процессе длительной откачки. Предельное давление в рабочем объеме p будет всегда выше, чем на входе насоса $p_{пр}$ и это связано с ограниченной проводимостью трубопровода, т.е. $p = \frac{p_{пр}}{K_n}$.

При выборе вакуумных насосов для установившегося режима должно выполняться два условия:

- 1) быстрота действия насоса S_n должна быть больше расчетного значения;
- 2) предельное давление $p_{пр}$ насоса должна быть меньше, чем требуемое рабочее давление в объеме p , т.е. $p_{пр} < K_n \cdot p$.

Быстрота откачки, при рабочем давлении рассчитывает для неустановившегося режима выбор насосов делается, исходя из заданного времени откачки.

Производительность насосов любого типа Q определяется как разность между прямым и обратным потоками, т.е.:

$$Q = Q_{пр} - Q_{обр}$$

При достижении предельного давления

$$Q_{пр} = Q_{обр} \text{ и } Q = 0$$

Обратный поток образуется за счет проницаемости стенок вакуумной камеры, диффузии из конструкционных материалов, натекания газа через течи, десорбции газов со всей оснастки вакуумной камеры, газовыделения из рабочих жидкостей, паров рабочих жидкостей насосов и др. Учет составляющих обратного потока ведется с учетом режима откачки (стационарный, нестационарный) и конструкций насосов (механические, паромасляные и др.)

Далее рассмотрены примеры решения задач.

- 1) Определить режим течения газа по длинному трубопроводу круглого сечения при откачке от давления p_1 до давления p_2 :

$$d = 0,1 \text{ м}; p_1 = 10^5 \text{ Па}; p_2 = 20 \text{ Па}.$$

Решение: Воспользуемся критериями Кнудсена:

для молекулярного режима $\bar{p} \cdot d \leq 0,02 \text{ Па} \cdot \text{м}$

для вязкостного режима $\bar{p} \cdot d \geq 1,33 \text{ Па} \cdot \text{м}$

Определяем граничное давление для молекулярного режима:

$$\bar{p} \leq \frac{0,02}{0,1} \leq 0,2 \text{ Па}$$

Граничные давления для вязкостного режима течения газа будет:

$$\bar{p} \geq \frac{1,33}{0,1} \geq 13,3 \text{ Па}$$

Таким образом, для заданных условий при откачке от атмосферного давления 10^5 Па до 20 Па имеет место вязкостный режим течения газа.

2) Рассчитать проводимость трубопровода в вязкостном режиме течения газа при среднем давлении газа 50 Па ; $d = 0,1 \text{ м}$; $l = 0,2 \text{ м}$.

Решение: для вязкостного режима проводимость трубопровода рассчитывается по формуле:

$$U_{\epsilon} = 1,36 \cdot 10^3 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p}$$
$$U_{\epsilon} = 1,36 \cdot 10^3 \cdot \frac{(10^{-1})^4}{2 \cdot 10^{-1}} \cdot 50 = 34 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Проводимость имеет размерность, аналогичную размерности быстроты откачки, – $\text{м}^3/\text{с}$.

3) Рассчитать проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения газа, начальное давление 10^{-1} Па , конечное давление – 10^{-4} Па ; $d = 0,1 \text{ м}$; $l = 0,2 \text{ м}$.

Решение: Определяем среднее давление и проверяем выполнение условия для молекулярного режима:

$$\bar{p} = \frac{10^{-1} + 10^{-4}}{2} \approx 0,05 \text{ Па}$$

$$\bar{p} \cdot d = 0,05 \cdot 0,1 = 0,005, \text{ т.е. меньше чем } 0,02 \text{ Па} \cdot \text{м}$$

Поэтому имеет место молекулярный режим, для которого проводимость не зависит от давления и рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{м}} = 38,1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}$$

В расчетах принимаем молекулярную массу газа $M=29$ и температуру газа $T=300 \text{ К}$

$$U_{\text{м}} = 38,1 \cdot \frac{(10^{-1})^3}{2 \cdot 10^{-1}} \cdot \sqrt{\frac{300}{29}} = 0,613 \text{ м}^3/\text{с}.$$

4) Рассчитать эффективную скорость откачки, если быстрота действия насоса составляет $1 \text{ м}^3/\text{с}$, а проводимость трубопровода, соединяющего насос с рабочим объемом, – $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$. Определить коэффициент использования насоса.

Решение: для расчета воспользуемся основным уравнение вакуумной техники:

$$S_0 = \frac{S_n \cdot U}{S_n + U},$$

т.е.

$$S_0 = \frac{1 \cdot 0,1}{1 + 0,1} \approx 0,09 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Коэффициент использования определяется отношением

$$K_u = \frac{S_0}{S_n} = \frac{0,09}{1} = 0,09$$

2. Определение основных параметров механических насосов

1) Рассчитать зависимость быстроты действия механического насоса от давления газа, если максимальная быстрота действия насоса $S_{\max} = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ и $p_{\text{пр}} = 1 \text{ Па}$.

Решение: зависимость рассчитывается по формуле (3.18):

$$S_p = S \left(1 - \frac{p_{\text{пр}}}{p} \right)_{\text{max}},$$

где p – давление, для которого рассчитывается скорость откачки. Зависимость рассчитывается для всего диапазона: от давления запуска p_z до предельного давления $p_{\text{пр}}$. Механический насос может начинать откачку с атмосферного давления, т.е. $p_z = 10^5 \text{ Па}$. Результаты расчетов представлены на рисунке 1. При построении зависимости необходимо по оси абсцисс давление представлять в логарифмической координате.

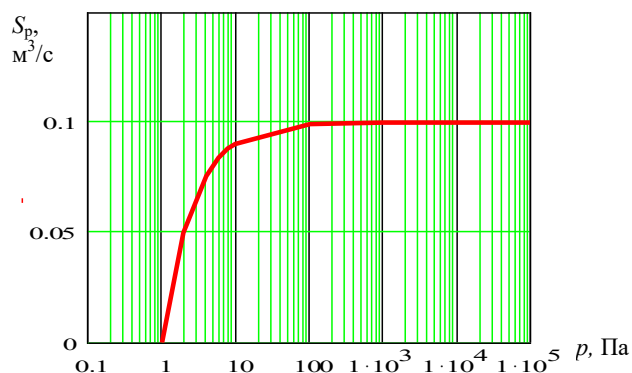


Рисунок 1 – Расчётная зависимость быстроты действия насоса от давления на его входе

Вывод: из зависимости видно, что скорость откачки насоса при предельном давлении равна нулю. Диапазон давлений газа, когда скорость откачки остается постоянной и максимальной, является рабочим.

3. Расчет параметров диффузионных насосов

Рассчитать степень сжатия газа диффузионным насосом.

Степень сжатия газа в струе пара есть отношение выпускного давления к предельному давлению и описывается уравнением (4.6):

$$\frac{p_{\text{вып}}}{p_{\text{пр}}} = \exp \left(\frac{v_{\text{п}} \cdot L}{D_{\text{гп}}} \right),$$

где $v_{\text{п}}$ – скорость струи пара;

L – длина струи пара;

$D_{\text{гп}}$ – коэффициент диффузии газа через струю пара на впускную сторону насоса.

Для случая, когда давление пара $p_{\text{п}}$ значительно больше давления газа в струе пара, коэффициент диффузии может быть определен:

$$D_{\text{гп}} = \frac{D_0}{n_{\text{п}}},$$

где D_0 – постоянная взаимной диффузии.

$$D_0 = \frac{3}{8\sqrt{2}\pi} \left(R T_{\text{п}} \frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} \right)^{1/2} \frac{1}{\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right)^2},$$

где σ_1, σ_2 – диаметр молекул соответственно газа и пара;

M_1, M_2 – молекулярный вес соответственно газа и пара;

R – универсальная газовая постоянная;

$T_{\text{п}}$ – температура пара.

Учитывая, что

$$n_{\text{п}} = \frac{p_{\text{п}}}{k \cdot T_{\text{п}}},$$

получаем

$$D_{\text{гп}} = 85,1 \cdot 10^{-23} \left(\frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} \right)^{1/2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)^{-2} \cdot T_{\text{п}}^{3/2} \cdot p_{\text{п}}^{-1},$$

где $p_{\text{п}}$ – давление пара в струе.

Для расчета во используется данными из приложения. Для масла ВМ-1 $M_2 = 450$ и $\sigma_2 = 10 \cdot 10^{-10}$ м. При номинальной мощности подогревателя насоса температура масла и пара равны 473 К; давление пара масла при этом соответствует 66 Па, а скорость пара $v_{\text{п}} = 200$ м/с. Для воздуха $M_1 = 29$, $\sigma_1 = 3,6 \cdot 10^{-10}$ м.

Коэффициент диффузии воздуха в струе пара масла будет составлять

$$\begin{aligned} D_{\text{гп}} &= 85,1 \cdot 10^{-23} \left[\frac{10^{-3}(29 + 450)}{10^{-6} \cdot 29 \cdot 450} \right]^{1/2} [10^{-10}(3,6 + 10)]^{-2} \cdot 473^{3/2} \cdot 66^{-1} \\ &= 0,434 \end{aligned}$$

Степень сжатия рассчитывается при длине струи $L = (2 - 5) \cdot 10^{-4}$ м.

Тогда $\frac{p_{\text{вып}}}{p_{\text{пр}}} = \exp \left(\frac{200 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{0,434} \right) \approx 10^4$

4. Расчет выбора вакуумных насосов для обеспечения заданного давления газа

1) Выбрать вакуумный насос для установившегося режима откачки, если требуется обеспечить скорость откачки рабочего объема $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ при давлении $5 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ при $K_n = 0,5$. Принять, что предельное давление насоса $p_{\text{пр}}$ должно быть меньше $K_n \cdot p$ в два раза.

Решение: при выборе насоса должно выполняться два условия:

- S_n должно быть больше расчетного значения;

- $p_{\text{пр}}$ меньше $K_n \cdot p$.

Принимаем: $p_{\text{пр}} = (K_n \cdot p)/2 = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-4} = 2,5 \cdot 10^{-4}$. Рассчитываем требуемую быстроту действия насоса по формуле (3.21):

$$S_n = \frac{S_0}{K_n \cdot \left(1 - \frac{p_{\text{пр}}}{p}\right)} = \frac{0,1}{0,5 \left(1 - \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-4}}\right)} = 0,4 \text{ м}^3/\text{с}$$

Далее по справочнику выбираем насос, который обеспечивал бы $S_n \geq 0,4 \text{ м}^3/\text{с}$ и давление $p_{\text{пр}} \leq 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$.

2) Выбрать вакуумный насос для неустановившегося режима откачки рабочего объема $V = 0,5 \text{ м}^3$ от давления $p_1 = 10^5 \text{ Па}$ до давления $p_2 = 5 \cdot 10^3 \text{ Па}$ за время 300 с . Принять $C = 1,245 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{Па}$.

Решение: при высоких давлениях газа, когда имеет место вязкостный режим течения газа, быстрота действия рассчитывается по формуле (3.29)

$$S_n = \frac{2,3 \cdot V \cdot \lg p_1/p_2}{(t_2 - t_1) - \frac{V}{C} \cdot \left(\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1}\right)} = \frac{2,3 \cdot 0,5 \cdot \lg 10^5/5 \cdot 10^3}{300 - \frac{0,5}{1,245 \cdot 10^{-4}} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot 10^3} - \frac{1}{10^5}\right)} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

3) Выбрать вакуумный насос для неустановившегося режима откачки рабочего объема $V = 0,5 \text{ м}^3$ от давления 1 Па до 10^{-4} Па за время 230 с при $K_n = 0,5$ и $p_{\text{пр}} = 10^{-5} \text{ Па}$.

Решение: Принимаем, что при относительно низких давлениях имеет место молекулярный режим течения газа. В этом случае быстрота действия насоса рассчитывается по формуле (3.27)

$$S_n = \frac{2,3 \cdot V}{K_n(t_2 - t_1)} \cdot \lg \left(\frac{p_1 - p_{\text{пр}}}{p_2 - p_{\text{пр}}}\right) = \frac{2,3 \cdot 0,5}{0,5 \cdot 230} \cdot \lg \left(\frac{1 - 10^{-5}}{10^{-4} - 10^{-5}}\right) = 0,04 \text{ м}^3/\text{с}$$

4) Выбрать насос для откачки камеры объемом $0,5 \text{ м}^3$ через трубопровод диаметром $0,1 \text{ м}$ и длиной $0,2 \text{ м}$ от атмосферного давления до $5 \cdot 10^3 \text{ Па}$ за время 300 с .

Решение: Необходимо определить режим течения газа:

$$\bar{p} = \frac{10^5 + 5 \cdot 10^3}{2} = 5,25 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Проверяем условие Кнудсена:

$$\bar{p} \cdot d = 5,25 \cdot 10^4 \cdot 0,1 = 5,25 \cdot 10^3 \geq 1,33 \text{ Па} \cdot \text{м}$$

Таким образом, режим будет вязкостный. Быстрота действия насоса рассчитывается по формуле (3.29). Проводимость трубопровода для вязкостного режима рассчитывается по формуле (2.21)

$$U_v = 1,36 \cdot 10^3 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p} = C \cdot \bar{p}$$

$$\text{Отсюда константа } C = 1,36 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,1^4}{0,2} = 0,68 \frac{\text{м}^3}{\text{с} \cdot \text{Па}}$$

$$S_n = \frac{2,3 \cdot V \cdot \lg p_1 / p_2}{(t_2 - t_1) - \frac{V}{C} \cdot \left(\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1} \right)} = \frac{2,3 \cdot 0,5 \cdot \lg(10^5 / 5 \cdot 10^3)}{300 - \frac{0,5}{0,68} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot 10^3} - \frac{1}{10^5} \right)} = 4,987 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}$$

5. Проектирование вакуумных установок и расчёт основных параметров

1) Разработать вакуумную систему для получения среднего вакуума $5 \cdot 10^{-3}$ Па, используя в качестве насосов для получения среднего вакуума: криоадсорбционный и механический. Выбрать конкретный тип насосов, если суммарное газовыделение и натекание составляет $4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$.

2) Разработать вакуумную систему для получения высокого вакуума 10^{-4} Па, используя паромасляный диффузионный и механический насосы. Рассчитать выбор насосов, совместимость их работы, если суммарное газовыделение и натекание составляет $8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$.

3) Разработать вакуумную систему для безмасляной откачки до высокого вакуума $5 \cdot 10^{-5}$ Па. Выбрать конкретные типы насосов и проверить совместимость их работы. $Q = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$.

4) Построить вакуумную систему для получения сверхвысокого вакуума, если имеются в распоряжении: паромасляный диффузионный насос с ловушкой; магниторазрядный насос; криоконденсационный насос; механический насос. Суммарное газовыделение и натекание не превышает $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$. Выбрать конкретные типы насосов и проверить совместимость их работы.

5) Спроектировать вакуумную систему установки, обеспечивающую возможность получения высокого вакуума. Исходные данные: суммарная производительность газовыделения и натекания $Q = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$; рабочее давление в камере $p = 10^{-3}$ Па. Размеры откачиваемого объема: диаметр и длина – 300 мм. Дополнительные условия – использование пароструйного и вращательного насосов. Выбрать элементы вакуумной системы и насосы. Рассчитать конструктивные размеры трубопроводов.

6) Спроектировать вакуумную систему в нестационарном режиме. Исходные данные: начальное и конечное давление в откачиваемом объеме $p_1 = 10^5$ Па и $p = 10^{-3}$ Па; объем камеры $V = 0,05 \text{ м}^3$; время откачки в нестационарном режиме 3600 с.

7) Рассчитать время откачки вакуумной системы, содержащей двухкомпонентную смесь сухого воздуха и паров воды. Проанализировать влияние паров воды на время откачки от атмосферного давления до $1 \cdot 10^{-4}$, 10^{-6} Па. Исходные данные: объем рабочей камеры $0,1 \text{ м}^3$, геометрическая площадь поверхности камеры 1 м^2 , эффективная скорость откачки $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Дополнительные условия: камера из нержавеющей стали, температура – комнатная.

8) Произвести проверочный расчет высоковакуумной системы, откачиваемой двумя насосами: паромасляным насосом типа Н-160/700 и механическим насосом объемного типа ВН-01. Рабочее давление $5 \cdot 10^{-4}$ Па. Размеры рабочей камеры: диаметр 300 мм, длина 300 мм, материал – нержавеющая сталь. Вакуумная система находится в атмосфере азота при давлении 10^5 Па и рабочей температуре 300 К. Задание: составить компоновочную схему вакуумной системы, рассчитать распределение давления, произвести графическую проверку выбора вакуумных насосов.

9) Составить компоновочную схему вакуумной системы для получения сверхвысокого вакуума $5 \cdot 10^{-7}$ Па. Произвести проверочный расчет выбранных насосов. Суммарное натекание и газовыделение $4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$.

10) Составить компоновочную схему вакуумной системы для получения высокого вакуума 10^{-4} Па, если суммарное газовыделение и натекание составляет $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$. Произвести графическую проверку совместимости работы насосов и рассчитать распределение давления в вакуумной системе.

11) Составить компоновочную схему вакуумной установки для получения высокого вакуума $5 \cdot 10^{-4}$ Па при откачке рабочей камеры диаметром 500 и длиной 500 мм. Произвести выбор насосов и рассчитать распределение давления в вакуумной системе.

12) Разработать вакуумную систему для получения сверхвысокого вакуума $5 \cdot 10^{-6}$ Па в рабочей камере с размерами: диаметр – 300 мм, длина – 500 мм. Суммарное газовыделение и натекание составляет $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$. Рассчитать выбор конкретных типов насосов и проверить совместимость их работы.

13) Произвести проверочный расчет высоковакуумной системы, откачиваемой двумя насосами: паромасляным Н-250/2500 и механическим насосом 2НВР-5ДМ. Рабочее давление – 10^{-4} Па. Суммарное газовыделение и натекание составляет $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$. Составить компоновочную схему вакуумной системы, рассчитать распределение давления.

14) Рассчитать вакуумную систему, выбрать диаметры высоко- и низковакуумной линии вакуумпровода и диффузионный и механический насосы. Давление в рабочей камере не более $2 \cdot 10^{-3}$ Па. Длина высоковакуумной линии 0,5 м низковакуумной – 1 м. Рабочая камера диаметром 0,5 м и высотой 0,75 м выполнена из нержавеющей стали. Технологическое газоотделение составляет $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$, натекание $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$.

Задания для самостоятельной работы студентов

Занятие № 1

- 1) Определить основные параметры механических насосов.
- 2) Рассчитать и построить зависимость скорости действия выбранного насоса от давления на входе насоса.

Занятие № 2

- 1) Рассчитать проводимость вакуумпроводов различных диаметров в зависимости от l/d . Диапазон давлений выбрать для вязкостного режима $l/d = 0,01-100$ см. Диапазон диаметров – (0,2-10) см.
- 2) Рассчитать эффективную скорость откачки.
- 3) Определить коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Занятие № 3

- 1) Нарисовать компоновочную схему вакуумной установки с механическим насосом для своего варианта.
- 2) Рассчитать предельное давление в рабочей камере.
- 3) Определить производительность насоса.

Занятие № 4

- 1) Рассчитать долю сконденсировавшихся паров в зависимости от давления газа в диапазоне (0,10-10) мм рт. ст. Давление насыщенных паров воды – 150, спирта – 350, ацетона – 750 мм рт. ст., $T = 300$ К.
- 2) Определить необходимое для полного предотвращения конденсации паров воды количество балластного газа на единицу скорости откачки насоса (Q_6/S_n) в зависимости от нагрузки на насос (при давлении пара в диапазоне 0-20 мм рт. ст.).

Занятие № 5

- 1) Рассчитать коэффициент сжатия для диффузионного насоса по воздуху, водороду, аргону, углекислому газу, гелию, криптону, азоту, неону, кислороду.
- 2) Рассчитать вакуум-фактор и реальную скорость откачки по этим газам.

Занятие № 6

- 1) Выбрать температуру криоконденсационного насоса для получения предельного давления в диапазоне ($10^{-4} - 10^{-8}$) Па при откачке азота, кислорода, воздуха, водорода, углекислого газа, паров воды.
- 2) Рассчитать скорость откачки криоконденсирующих насосов и ловушек.
- 3) Рассчитать предельное давление, которое можно обеспечить с помощью криосорбционной откачки с одним и тремя насосами, параллельно подключенными к откачиваемому объему. Адсорбенты: активированный уголь, цеолит силикагель. Газы: гелий, неон, водород, азот. Температура адсорбента 77 К. Объем рабочей камеры – 30, 50, 100 л; объем адсорбента – 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 л.

Занятие № 7

Рассчитать скорость откачки с помощью ионного насоса от 10^{-1} до 10^{-4} Па при следующих геометрических размерах насоса: диаметр 85, 300, 590, 60, 400 мм; длина 203, 500, 840, 180, 530 мм; ток 100, 200, 300, 400, 500 мА.

Варианты заданий для контрольной работы

Вариант № 1

- 1) Основное уравнение вакуумной техники. На что влияет проводимость трубопроводов и от чего она зависит?
- 2) Криоконденсационные насосы. Как зависят характеристики насосов от температуры криопанели?

Вариант № 2

- 1) Показать необходимость высокого вакуума при напылении пленок. Определить границы по давлению.
- 2) Принцип откачки ионно-сорбционных насосов с холодными электродами (магниторазрядные насосы).

Вариант № 3

- 1) Механические насосы. Основные характеристики.
- 2) Зависимость скорости действия паромасляного диффузионного насоса от впускного давления.

Вариант № 4

- 1) Что такое скорость действия насосов? Как ее определить в зависимости от режимов течения газов по трубопроводам?
- 2) Принцип пароструйной откачки. Зависимость коэффициента сжатия насоса от рода газа.

Вариант № 5

- 1) Каким образом произвести откачку рабочей камеры при наличии большого количества паров воды?
- 2) Ионные насосы. Чем ограничивается работа насосов при давлениях, близких к предельному давлению?

Вариант № 6

- 1) Объяснить принцип молекулярной откачки. Пределы работы молекулярных насосов по давлению.
- 2) Принцип работы трехступенчатого паромасляного диффузионного насоса. Сформулируйте требования к параметрам ступеней.

Вариант № 7

- 1) Степень сжатия молекулярных насосов. От каких параметров она зависит?
- 2) Характеристики диффузионных насосов. Какие факторы и почему влияют на предельное давление этих насосов?

Вариант № 8

1) Зависимость быстроты действия насоса от входного давления. Как рассчитать длительность откачки, зная быстроту действия насоса и коэффициент использования?

2) Способ получения высокого вакуума с помощью цеолитовых насосов.
Вариант № 9

1) Как произвести выбор вакуумного насоса в неустановившемся режиме?

2) Быстрота действия паромасляных диффузионных насосов. Как обеспечить одинаковую скорость откачки для различных газов?

Вариант № 10

1) Объяснить принцип объемной откачки. Чем определяется величина предельного давления?

2) Принцип работы одноступенчатого диффузионного насоса. Что будет, если в насосе использовать в качестве рабочей жидкости ртуть или воду?

Вариант № 11

1) Основное уравнение вакуумной техники. Объяснить, что такое коэффициент использования насоса.

2) Проанализировать зависимость быстроты откачки диффузионного насоса от входного давления. Чем отличается реальная быстрота откачки от теоретической?

Вариант № 12

1) Как произвести выбор вакуумного насоса в установившемся режиме?

2) Механические масляные насосы. Проанализировать влияние вредного пространства на предельное давление. Пути решения этой проблемы.

Вариант № 13

1) Конденсируемые пары и их влияние на характеристики механических насосов.

2) Многоступенчатая откачка с помощью цеолитовых насосов.

Вариант №14

1) Принцип газового балласта. В каком месте следует делать напуск балластного газа.

2) Ионно-сорбционная откачка. Какими параметрами определяется скорость откачки этих насосов?

Вариант №15

1) Основное уравнение вакуумной техники. На что влияет проводимость трубопроводов и от чего она зависит?

2) Паромасляные диффузионные насосы. Зависимость $p_{пр}$ и $p_{вып}$ от мощности подогревателя.

Вариант №16

1) Механические насосы. Основные характеристики.

2) Паромасляные диффузионные насосы. Зависимость быстроты откачки от давления для двух значениях мощности подогревателя.

Вариант №17

1) Что такое быстрота действия насосов? Как ее определить в зависимости от режимов течения газов по трубопроводам?

2) Паромасляные диффузионные насосы. Что такое селективность откачки?

Вариант №18

1) Каким образом произвести откачку рабочей камеры при наличии большого количества паров воды?

2) Пароструйная откачка. Что будет, если охлаждение насоса будет недостаточно хорошее?

Вариант №19

1) Объяснить принцип молекулярной откачки. Пределы работы молекулярных насосов по давлению.

2) Паромасляные диффузионные насосы. Зависимость быстроты откачки от давления на входе для одно- и трехступенчатых насосов.

Вариант №20

1) Объяснить принцип объемной откачки. Чем определяется величина предельного давления?

2) Паромасляные диффузионные насосы зависимость степени сжатия от рода газа.

Вариант №21

1) Основное уравнение вакуумной техники. Объяснить, что такое коэффициент использования насоса.

2) Паромасляные диффузионные насосы зависимость быстроты откачки от входного давления для легких и тяжелых газов.

Вариант №22

1) Как произвести выбор вакуумного насоса в установившемся режиме?

2) Пароструйные насосы. Что будет, если в качестве рабочей жидкости взять воду, ртуть и масло?

Индивидуальные задания

1) Ионные насосы. Рассчитать зависимость скорости откачки от геометрических размеров насоса, эффективности ионизации и др. Предложить пути совершенствования этих насосов.

2) Криоконденсационные насосы. Рассчитать быстроту откачки для различных газов (азот, кислород, неон, водород) при двух температурах 293 и 78 К. Сделать анализ характеристик крионасосов.

3) Принцип криоадсорбционной откачки. Рассчитать давление газа в рабочей камере объемом $0,1 \text{ м}^3$ при откачке одноступенчатым цеолитовым насосом. Как изменится давление, если к рабочей камере подключить параллельно три насоса.

4) Ионные насосы. Рассчитать коэффициент компрессии и предельное давление таких насосов.

5) Паромасляные диффузионные насосы. Рассчитать зависимость быстроты действия насоса от входного давления с учетом вакуум-фактора. Как влияет на эту зависимость род газа?

6) Быстрота действия паромасляных диффузионных насосов. Как обеспечить одинаковую скорость откачки для различных газов?

7) Принцип пароструйной откачки. Рассчитать зависимость предельного давления от выпускного для легких и тяжелых газов.

8) Рассчитать выбор форвакуумного насоса для паромасляного диффузионного насоса Н-5С-М при откачке рабочей камеры объемом $0,1 \text{ м}^3$ до давления 10^{-3} Па .

9) Принцип действия вымораживающей ловушки. Рассчитать скорость вымораживания паров воды и двуокиси углерода.

10) Титановый насос с накаливаемым катодом. Зависимость скорости откачки от рода газа.

11) Рассчитать объем форвакуумного баллона, предназначенного для создания необходимого разряжения при работе высоковакуумного насоса, когда вспомогательный насос переключен на вспомогательную линию откачки. Расчетное время откачки составляет 240 с. Суммарный поток газовыделений и натекания составляет $8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \text{ Па/с}$.

12) Рассчитать длительность откачки рабочей камеры технологической установки объемом $0,5 \text{ м}^3$ в диапазоне давлений $(1 \div 10^{-4}) \text{ Па}$. Сделать выбор насоса.

13) Криоконденсационная откачка. Рассчитать изменение предельного давления с повышением температуры поверхности криоосадка и увеличением его толщины.

14) Магниторазрядные насосы. Рассчитать скорость хемосорбционной и ионной откачки активных и инертных газов.

15) Многоступенчатая откачка с помощью цеолитовых насосов. Рассчитать конечное давление в рабочем объеме 120 л, если число насосов равно 3.

16) Тепловые вакуумметры. Анализ зависимости чувствительности тепловых вакуумметров от температуры нити и температуры баллона.

17) Тепловые вакуумметры сопротивления. Анализ влияния размеров и материала нити датчика, рабочей температуры нити и др. на предел работы вакуумметра.

18) Тепловые вакуумметры. Проанализировать зависимость диапазона измеряемых давлений от размеров нити, температуры нити и баллона при следующих условиях: материал нити – вольфрам, диаметр нити (0,1÷1,0) мм, длина нити 60 мм, температура нити – (373÷600) К, температура баллона (30÷295) К.

19) Электронные ионизационные вакуумметры. Проанализировать факторы, ограничивающие пределы измерения давления.

20) Проблемы измерения сверхвысокого вакуума и пути их решения.

21) Магнитные электроразрядные манометры с холодным катодом. Рассчитать траекторию движения электрона и вероятность ионизации в диапазоне давлений (10^{-1} ÷ 10^{-5}) Па. $U_p=2000$ В, I_p мА.

22) Разработать вакуумную систему для получения среднего вакуума $5 \cdot 10^{-3}$ Па, используя в качестве насосов для получения среднего вакуума: криоадсорбционный и механический. Выбрать конкретный тип насосов, если суммарное газовыделение и натекание составляет $4 \cdot 10^{-5}$ м³ Па/с.

23) Разработать вакуумную систему для получения высокого вакуума 10^{-4} Па, используя паромасляный диффузионный и механический насосы. Рассчитать выбор насосов, совместимость их работы, если суммарное газовыделение и натекание составляет $8 \cdot 10^{-6}$ м³ Па/с.

24) Разработать вакуумную систему для безмасляной откачки до высокого вакуума $5 \cdot 10^{-5}$ Па. Выбрать конкретные типы насосов и проверить совместимость их работы. $Q=4 \cdot 10^{-6}$ м³ Па/с.

25) Построить вакуумную систему для получения сверхвысокого вакуума, если имеются в распоряжении: паромасляный диффузионный насос с ловушкой; магниторазрядный насос; криоконденсационный насос; механический насос. Суммарное газовыделение и натекание не превышает $5 \cdot 10^{-7}$ м³ Па/с. Выбрать конкретные типы насосов и проверить совместимость их работы.

26) Спроектировать вакуумную систему установки, обеспечивающую возможность получения высокого вакуума. Исходные данные: суммарная производительность газовыделения и натекания $Q=3 \cdot 10^{-5}$ м³ Па/с; рабочее давление в камере $p = 10^{-3}$ Па. Размеры откачиваемого объема: диаметр и длина – 300 мм. Дополнительные условия – использование пароструйного и вращательного насосов. Выбрать элементы вакуумной системы и насосы. Рассчитать конструктивные размеры трубопроводов.

27) Спроектировать вакуумную систему в нестационарном режиме. Исходные данные: начальное и конечное давление в откачиваемом объеме $p_1 =$

10^5 Па и $p = 10^{-3}$ Па; объем камеры $V=0,05$ м³; время откачки в нестационарном режиме 3600 с.

28) Рассчитать время откачки вакуумной системы, содержащей двухкомпонентную смесь сухого воздуха и паров воды. Проанализировать влияние паров воды на время откачки от атмосферного давления до 1, 10^{-4} , 10^{-6} Па. Исходные данные: объем рабочей камеры 0,1 м³, геометрическая площадь поверхности камеры 1 м², эффективная скорость откачки $5 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Дополнительные условия: камера из нержавеющей стали, температура – комнатная.

29) Произвести проверочный расчет высоковакуумной системы, откачиваемой двумя насосами: паромасляным насосом типа Н-160/700 и механическим насосом объемного типа ВН-01. Рабочее давление $5 \cdot 10^{-4}$ Па. Размеры рабочей камеры: диаметр 300 мм, длина 300 мм, материал – нержавеющая сталь. Вакуумная система находится в атмосфере азота при давлении 10^5 Па и рабочей температуре 300 К. Задание: составить компоновочную схему вакуумной системы, рассчитать распределение давления, произвести графическую проверку выбора вакуумных насосов.

30) Составить компоновочную схему вакуумной системы для получения сверхвысокого вакуума $5 \cdot 10^{-7}$ Па. Произвести проверочный расчет выбранных насосов. Суммарное натекание и газовыделение $4 \cdot 10^{-6}$ м³ Па/с.

31) Составить компоновочную схему вакуумной системы для получения высокого вакуума 10^{-4} Па, если суммарное газовыделение и натекание составляет $5 \cdot 10^{-6}$ м³ Па/с. Произвести графическую проверку совместимости работы насосов и рассчитать распределение давления в вакуумной системе.

32) Составить компоновочную схему вакуумной установки для получения высокого вакуума $5 \cdot 10^{-4}$ Па при откачке рабочей камеры диаметром 500 и длиной 500 мм. Произвести выбор насосов и рассчитать распределение давления в вакуумной системе.

33) Разработать вакуумную систему для получения сверхвысокого вакуума $5 \cdot 10^{-6}$ Па в рабочей камере с размерами: диаметр – 300 мм, длина – 500 мм. Суммарное газовыделение и натекание составляет $5 \cdot 10^{-6}$ м³ Па/с. Рассчитать выбор конкретных типов насосов и проверить совместимость их работы.

34) Произвести проверочный расчет высоковакуумной системы, откачиваемой двумя насосами: паромасляным Н-250/2500 и механическим насосом 2НВР-5ДМ. Рабочее давление – 10^{-4} Па. Суммарное газовыделение и натекание составляет $5 \cdot 10^{-6}$ м³ Па/с. Составить компоновочную схему вакуумной системы, рассчитать распределение давления.

35) Рассчитать вакуумную систему, выбрать диаметры высоко- и низковакуумной линии вакуумпровода и диффузионный и механический насосы. Давление в рабочей камере не более $2 \cdot 10^{-3}$ Па. Длина высоковакуумной линии 0,5 м низковакуумной – 1 м. Рабочая камера диаметром 0,5 м и высотой 0,75 м выполнена из нержавеющей стали. Технологическое газоотделение составляет $2 \cdot 10^{-5}$ м³ Па/с, натекание $5 \cdot 10^{-5}$ м³ Па/с.

36) Быстрота действия паромасляных диффузионных насосов. Как обеспечить одинаковую скорость откачки для различных газов?

37) Проанализировать изменение режимов течения газов в зависимости от размеров длинных трубопроводов (от десятков мм до долей мм).

38) Механические масляные насосы. Проанализировать влияние вредного пространства на предельно давление. Пути решения этой проблемы.

39) Принцип газового балласта. Определить условие предотвращения конденсации. Рассчитать количество напускаемого газа при давлениях пара от 1 до 20 мм рт. ст. и $p_{\text{г}}/p_{\text{п}} = 0,1,2,3,4$.

40) Молекулярные насосы. Проанализировать зависимость предельного давления от основных параметров насосов.

41) Определить составляющие суммарного потока газовыделения в стационарном режиме.

42) Способы улучшения вакуума в технологических установках для напыления пленок.

43) Ионизационные вакуумметры. Анализ чувствительности манометра от различных факторов в широком диапазоне давлений.

44) Определить составляющие суммарного потока газовыделения в нестационарном режиме.

45) Разработать вакуумную систему для получения давления 10^{-4} Па, используя паромасляный диффузионный и механический насосы суммарное газовыделение и натекание составляет $8 \cdot 10^{-6}$ м³ Па/с.