

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и наноэлектроники

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических и контрольных работ  
**«Вакуумная техника»**  
для студентов направления подготовки  
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»,  
профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»  
заочной формы обучения

Воронеж 2019

**УДК 621.52**  
**ББК**

Составители: канд. физ.-мат. наук Е. П. Николаева,  
канд. тех. наук С. О. Николаева

Методические указания к выполнению практик и контрольных работ по дисциплине «Вакуумная техника» для студентов направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника», профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника» заочной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Е. П. Николаева, С. О. Николаева. Воронеж, издательство ВГТУ, 2019. 50 с.

Методические указания содержат сведения о физических процессах в разряженных газах, теоритические вопросы откачки, принцип построения вакуумных систем, методику проектного расчета вакуумных систем. Методические указания предназначены для студентов третьего курса заочной формы обучения.

Издание подготовлено в электронном виде и содержится в файле «Му пз ВТ.pdf».

**УДК 621.52**  
**ББК**

**Рецензент** С. А. Акулинин д-р техн. наук, проф. кафедры полупроводниковой электроники и наноэлектроники ВГТУ

Издается по решению учебно-методического совета  
Воронежского государственного технического университета

# 1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ФИЗИКИ РАЗРЯЖЕННЫХ ГАЗОВ

## 1.1. Уравнение состояния идеального газа

$$PV = kNT, \quad (1.1)$$

где  $P, V, T$  – давление, объем, температура газа соответственно;  $N$  – общее число молекул при фиксированных  $P, V, T$ ;  $k = 1,38 \cdot 10^{23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

## 1.2. Давление газов

Давление газов есть суммарный импульс, который сообщается вследствие теплового движения ударами молекул газа в единицу времени поверхности стенки сосуда, содержащего газ.

$$P = 2/3 \frac{N_1 m v^2}{2}, \quad \frac{N_1 m v^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (1.2)$$

где  $N_1$  – число молекул в единице объема;  $m$  – масса молекулы,  $v$  – среднеквадратичная скорость.

Единица давления – Па;  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ .

Из уравнения (1.1) следует:

$$P = N_j kT, \quad (1.3)$$

$$PV = \frac{Nm}{M} RT, \quad (1.4)$$

или

$$PV = nRT, \quad (1.5)$$

где  $R$  – газовая постоянная.

$$R = kN_A, \quad (1.6)$$

где  $N_A$  – число молекул в моле или число Авагадо;

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{26} \text{ 1/кмоль}, R = 8,31 \cdot 10^3 \text{ Дж/К} \cdot \text{кмоль}$$

### 1.3 Энергия и скорость молекул.

Из уравнения (2) следует, что кинетическая энергия поступательного движения молекул равна

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}KT, \quad (1.7)$$

тогда среднеквадратичная скорость

$$v_{KB} = \sqrt{\frac{3KT}{\pi n}} = \sqrt{\frac{3RT}{\pi M}}, \text{ м/с} \quad (1.8)$$

Среднеарифмитичная скорость равна

$$v_A = \sqrt{\frac{8KT}{\pi n}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}, \text{ м/с} \quad (1.9)$$

Для примера: для азота  $v_{KB} = 511 \text{ м/с}$  при  $T = 20^\circ \text{ C}$ .

### 1.4. Число молекул, падающих на поверхность

Как следует из уравнений (1.3) и (1.9), число молекул газа  $Nv$ , ударяющихся в единицу поверхности стенки сосуда, содержащего газ, в единицу времени равно

$$N_v = \frac{1}{4}N_1v_a = \frac{N_1}{4} \sqrt{\frac{8KT}{\pi n}} = \frac{P}{\sqrt{2\pi nkT}} \quad (1.10)$$

или объем газа  $Vv$ , ударяющийся в единицу времени в единицу поверхности.

$$v_A = \frac{N_1mv^2}{4}, \quad (1.11)$$

### 1.5. Длина свободного пробега молекул

Длина свободного пробега –  $\lambda$  между столкновениями молекулами газа:

$$\lambda = \frac{v_a}{z}, \quad (1.12)$$

где  $v_a$  – средняя арифметическая скорость,  $z$  – число столкновений в единицу времени:

$$\lambda = \frac{v_a}{z} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}N_1\sigma^2}, \quad (1.13)$$

где  $N_1$  – число молекул в единице объема,  $\sigma$  – диаметр молекул. Так как

$$P_V = N_1 kT, \quad (1.14)$$

следовательно

$$\sim \lambda \sim \frac{const}{P} \quad (1.15)$$

или

$$P\lambda = const,$$

если

$$P = 1Па \quad \lambda P = \lambda', \quad (1.16)$$

где  $\lambda'$  – справочная величина, так для воздуха при  $T=298$  К  $\lambda' = 6,2 \cdot 10^{-3}$  м, следовательно, при любом давлении можно определить  $\lambda$ :

$$\lambda = \lambda'/P \quad (1.17)$$

Например для воздуха при атмосферном давлении  $\lambda=0,06$  Мкм, при  $P=10^{-3}$  Па – 6,2 м, при  $P=10^{-6}$  Па –  $6,2 \cdot 10^3$  м.

1.6. Длина свободного пробега и степени вакуума

Важнейшие свойства газов и явления в газовой среде изменяются в зависимости от отношения  $\lambda/d$ , где  $d$  – характерный линейный размер сосуда.

$\lambda \ll d$  – вязкостный режим течения газа (столкновением молекул);

$\lambda \gg d$  – молекулярный режим течения газа (столкновения молекул со стенками);

$\lambda \approx d$  – молекулярно-вязкостный режим течения газа.

Критерии границ режимов течения газа приведены в табл. 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1

Критерии границ режимов течения газа ( $\lambda/d$ )

Режим	Граница, Па·м	
	Верхняя	Нижняя
Вязкостный	Атм. давление	$\lambda/d \leq 5 \cdot 10^{-3}$
Молекулярно-вязкостный	$\lambda/d > 5 \cdot 10^{-3}$	$\lambda/d \leq 1,5$
Молекулярный	$\lambda/d > 1,5$	$\infty$

При расчётах более удобно использовать в качестве критерия  $P \cdot d$ , а не  $\lambda/d$ .

Известно, что при постоянной температуре  $\lambda \cdot P = \text{const} = \lambda'$ , где  $\lambda'$  – средняя длина свободного пробега при  $P = 1$  Па.

Значения  $\lambda'$  вычислены и табулированы.

Для воздуха при  $T = 298$  К  $\lambda' = 6,2 \cdot 10^{-3}$  мПа. Следовательно, при любом давлении для воздуха можно определить  $\lambda$  по уравнению

$$\lambda = \frac{6,2 \cdot 10^{-3}}{P}, \text{ м.} \quad (1.18)$$

Используя это выражение (1.18), приведем таблицу критериев режима течения газа через значение величины  $P \cdot d$

Критерии границ режимов течения газа ( $P \cdot d$ )

Режим	Граница, Па·м	
	Верхняя	Нижняя
Вязкостный	Атм. давление	$P \cdot d \geq 1,33$
Молекулярно-вязкостный	$P \cdot d < 1,33$	$P \cdot d \geq 2 \cdot 10^{-2}$
Молекулярный	$P \cdot d < 2 \cdot 10^{-2}$	$P \rightarrow 0$

## 1.7. Явление переноса в газовой среде.

В общем случае явление переноса возникают при неоднородном распределении концентрации молекул, температуры, количества движения.

## 1. Теплопроводимость газов.

Коэффициент теплопроводимости

$$K = const \rho v_a \lambda C_V, \quad (1.19)$$

где  $C_V$  – теплоемкость, при постоянном объеме,  $\rho$  – плотность.

Таким образом

$$K = const P \lambda, \quad (1.20)$$

так как

$$\lambda \sim \frac{1}{P}, \quad (1.21)$$

то в условиях низкого вакуума (вязкостный режим) теплопроводность газа не зависит от давления. В условиях высокого вакуума (молекулярный режим)  $\lambda = d$  и  $k = const P$ , т.е. теплопроводность пропорционален пропорциональна давлению.

В условиях среднего вакуума  $\lambda \sim d$  (молекулярный вязкостный режим) имеет место нелинейная зависимость.

## 2. Вязкость газов.

Явление переноса количества движения через слой газа называется вязкостью или внутренним трением.

Коэффициент вязкости

$$\eta = \text{const} \rho v_a \lambda. \quad (1.22)$$

В условиях низкого вакуума  $\lambda \sim 1/\rho$ , а  $\rho \sim P$ , т.е.  $\eta$  не зависит от давления.

В условиях высокого вакуума ( $\lambda = d = \text{const}$ ), т.е.  $\eta = \text{const} P$ , имеет место пропорциональная зависимость.

## 3. Диффузия газов

Коэффициент самодиффузии газов  $D$  равен

$$D = \text{const} v_a \cdot \lambda, \quad (1.23)$$

Таким образом, в условиях низкого вакуума  $\lambda \sim \frac{1}{P}$ . Коэффициент диффузии обратно пропорционален давлению:

$$D = \frac{\text{const}}{P}. \quad (1.24)$$

В условиях высокого вакуума  $\lambda = d$ , т.е.  $D$  не зависит от  $\lambda$ , и, следовательно, от давления.

## 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЗОВ С ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ

2.1. Явление сорбции и десорбции позволяет:

- 1) разработать эффективные методы получения сверхвысокого вакуума (СВВ);
- 2) выбрать метод и режим десорбции;
- 3) выбрать оптимальную конструкцию вакуумных систем.

Различают два вида сорбции:

- адсорбция – поглощение газа поверхностью твердого тела;
- абсорбция – поглощение газа объемом твердого тела.

2.2. Адсорбция в зависимости от характера взаимодействия газа с поверхностью твердого тела различается:

- физическая адсорбция (характер взаимодействия сила Ван-дер-Ваальса). Физическая адсорбция – обратима.
- химическая адсорбция характеризуется более прочными изменением (диссоциация), но химического соединения нет. Процесс химической адсорбции частично обратим.

Уравнение мономолекулярной адсорбции

$$Q = \frac{bP}{1+bP}, \quad Q = \frac{N_{ag}}{N_M}, \quad (1.25)$$

где  $Q$  – степень заполнения поверхности газом;  $N_{ag}$  – количество адсорбированных молекул на единицу поверхности;  $N_M$  – количество активных центров поглощения на единицу поверхности твердого тела  $[(0,4 - 2,5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}]$ .

Например для  $N_2$  на поверхности стали  $Q \sim 7 \cdot 10^{-3}$ . Для  $\text{H}_2\text{O}$  на бумаге  $Q$ , полученное по уравнению (25)  $Q > 1$ , т.е. имеет место полимолекулярная адсорбция, для расчета которой нужно учитывать энергию активации адсорбции и энергию активации конденсации, тогда расчет по формуле полимолекулярной адсорбции  $Q = 3$  при  $P \sim 10^{-3}$  Па.

Для паров масла например при  $P \sim 10^{-5}$  Па  $Q = 5$  и даже при  $P \sim 10^{-10}$  Па на поверхности твердого тела существует мономолекулярный слой масла.

### 2.3. Абсорбция – поглощение газа объемом твердого тела

Абсорбция разделяется на два вида:

- образование твердого раствора, обусловленного диффузией газа в объем твердого тела;
- химическая реакция.

Вещества, поглощающие газ химической реакции называются геттерами.

Растворимость – максимальная концентрация газов при данных условиях (P,T), измеряется количеством газа, растворившегося до насыщения в единице объема твердого тела:

$$S = S_0 p^{1/n} \exp \left( \pm \frac{\Delta E_p}{nRT} \right), \quad (1.26)$$

где  $S_0$  – константа растворимости;  $\Delta E_p$  – энергия активации растворимости;  $n$  – число атомов при дислокации молекул; знак « $\pm$ » - характеризует разную зависимость от температуры.

Для металлов Ti, Ta, V, Pd и др. растворимость газа уменьшается с температурой (химическая реакция).

Для металлов Ni, Fe, Cu, Cr, Al – растворимость увеличивается с температурой (диффузия газов).

Значения растворимости для некоторых газов и материалов табулированы для  $P=1$  Па.

### 2.4. Диффузия и проницаемость газов в твердых телах.

Абсорбционный процесс растворимости газов в твердых телах осуществляется за счет диффузии.

Проницаемость газов – диффузия газов через стенку твердого тела. Поток проницаемости газа через стенку толщиной  $b$  и площадью  $A$  равен

$$Q_{\text{прон}} = q_{\text{прон}} \left( p_1^{1/n} - p_2^{1/4} \right) \frac{A}{b}, \quad \left( \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right). \quad (1.27)$$

Удельный поток проницаемости через стенку единичной толщины

$$q_{\text{прон}} = K_{o_{\text{прон}}} \exp\left(-\frac{\Delta E_{\text{прон}}}{nKT}\right), \quad (1.28)$$

где  $q_{\text{прон}}$  и  $K_o$  – константа проницаемости;  $\Delta E_{\text{прон}}$  – энергия активации проницаемости (справочные данные).

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОТКАЧКИ

3.1. Основное уравнение вакуумной техники. Проводимость сложного трубопровода

Быстротой действия вакуумной системы  $S_i$  в произвольном сечении трубопровода называется объем газа, проходящий через это сечение в единицу времени при давлении  $P_i$ .

Быстротой откачки объекта  $S_0$  называется объем газа, поступающий в единицу времени из откачиваемого объекта в трубопровод при данном давлении:

$$S_0 = \left. \frac{dV}{dt} \right|_{P=P_0} . \quad (1.29)$$

Быстрота действия насоса – это объем газа, удаляемого насосом в единицу времени через входной патрубок при давлении  $P_n$ .

$$S_n = \left. \frac{dV}{dt} \right|_{P=P_n} . \quad (1.30)$$

Для стационарного потока выполняется условие

$$Q = S_0 P_0 = S_n P_n = U(P_n - P_0). \quad (1.31)$$

Стационарный газовый поток через элементы вакуумной системы является следствием существующей в них разности давлений и рассчитывается следующим образом:

$$Q = U(P_n - P_0). \quad (1.32)$$

Для ряда параллельно соединенных элементов общая проводимость и сопротивление сложного трубопровода равны:

$$U_{нар} = \sum_1^n U_i ; \quad (1.33)$$

$$\frac{1}{W_{нар}} = \sum_1^n \frac{1}{W_i}, \quad (1.34)$$

где  $U_i$  – проводимость трубопровода, м<sup>3</sup>/с;  $W_i$  – сопротивление трубопровода, с/м<sup>3</sup>.

Для ряда последовательно соединенных элементов общая проводимость и сопротивление сложного трубопровода равны:

$$W_{посл} = \sum_1^n W_i; \quad (1.35)$$

$$\frac{1}{U_{посл}} = \sum_1^n \frac{1}{U_i}. \quad (1.36)$$

Вакуумные системы включают трубопроводы различной длины и поперечного сечения, соединённых последовательно, параллельно, краны, отверстия и др.

Из уравнения (1.31) следует основное уравнение вакуумной техники:

$$S_o = \frac{U \cdot S_H}{U + S_H}. \quad (1.37)$$

Основное уравнение вакуумной техники позволяет рассчитать эффективную быстроту откачки вакуумного объекта  $S_o$ , и предельное давление  $P_{пред}$  для данных быстроты действия насоса и проводимости сложного трубопровода.

Значения проводимости круглого трубопровода отверстий при разных режимах течения газа приведены в табл. 1.3 и 1.4.

Таблица 1.3

## Проводимость трубопровода для воздуха

Режим	Проводимость газа круглого трубопровода, м <sup>3</sup> /с	Проводимость газа круглого трубопровода для воздуха при T = 298 К, м <sup>3</sup> /с
Вязкостный	$U_{ТВ} = \frac{\pi d^4}{128\eta l} P_{cp}$	$U_{ТВ} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} P_{cp}$
Молекулярный	$U_{ТМ} = 38,2 \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{d^3}{l}$	$U_{ТМ} = 121 \frac{d^3}{l}$
Молекулярно-вязкостный	$U_{ТМВ} = bU_{ТМ} + U_{ТВ}$	---

Для технических расчетов  $b = 0,9$ .

Таблица 1.4

## Проводимость отверстий для воздуха

Режим	Проводимость отверстия площадью A, м <sup>3</sup> /с	Проводимость крана для воздуха при T = 298 К, м <sup>3</sup> /с
Вязкостный	$U_{ОВ} = 200A$	$U_{КВ} = 0,6U_{ОВ}$
Молекулярный	$U_{ОМ} = 116A$	$U_{КМ} = 0,1U_{ОМ}$
Молекулярно-вязкостный	$U_{ОМВ} = U_{ОМ} + \frac{U_{ОВ} - U_{ОМ}}{P_B - P_M} \times (P_i - P_M)$	$U_{КМВ} = U_{КМ} + \frac{U_{КВ} - U_{КМ}}{P_i - P_M} \times (P_i - P_M)$

$P_B$  – верхняя граница молекулярно-вязкостного режима;

$P_M$  – нижняя граница молекулярно-вязкостного режима;

$P_i$  – давление, для которого определяется режима течения газа;

$l$  – длина трубопровода.

При течении газа по трубопроводу необходимо учитывать влияние местных сопротивлений. Принимается, что влияние изгиба трубопровода под углом 90° учитывается удлинением трубопровода на 1.33 диаметра:

$$L_{расч} = I_{факт} + d \cdot i, \quad (1.39)$$

где  $i$  – число изгибов трубопровода.

Проводимость крана в вязкостном режиме можно считать равной (50 – 70) % проводимости отверстия, в молекулярном режиме – (6 – 15) %.

Проводимость трубопровода при переходе от одной температуры к другой определяется формулой

$$U_{T_1}/U_{T_2} = \sqrt{T_1/T_2}. \quad (1.40)$$

### 3.2. Длительность откачки.

За время  $dt$  из объекта объемом  $V$  удаляется

$$Q_1 = S_0 P dt, \quad (1.41)$$

где  $P$  – изменяющееся давление.

За счет газовыделения в вакуумную камеру поступает поток газа  $Q_2$

$$Q_2 = Q_\Sigma \cdot d. \quad (1.42)$$

Отсюда следует

$$VdP = Q_2 - Q_1 = Q_\Sigma \cdot dt - S_0 P dt,$$

тогда

$$dt = \frac{V \cdot dt}{Q_\Sigma - S_0 P},$$

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{P_{нач} - Q_\Sigma / S_0}{P - Q_\Sigma / S_0}. \quad (1.43)$$

При длительной откачке  $t \rightarrow \infty$ :

$$P_{\text{пред}} = \frac{Q_{\Sigma}}{S_0}, \quad (1.44)$$

где  $S_0$  – быстрота откачки вакуумного объекта, т.е. объема газа, удаляемого из объекта в единицу времени при давлении  $P$ .

### 3.3. Суммарный поток газовой выделения

В общем случае суммарный газовый поток определяют четыре потока газов, поступающих в вакуумную систему:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{изд}} + Q_{\text{ст}} + Q_{\text{нат}} + Q_{\text{прон}} = P_{\text{пред}} \cdot S_0, \quad (1.45)$$

где  $Q_{\text{изд}}$  – поток газов, поступающих из обрабатываемых изделий;  $Q_{\text{ст}}$  – поток газов, выделяющийся со всех стенок, обращенных в вакуумную плоскость;  $Q_{\text{нат}}$  – поток газов, натекающих в вакуумную систему через неплотности;  $Q_{\text{прон}}$  – поток газов, поступающих в вакуумную систему за счет проницаемости;  $P_{\text{пред}}$  – предельное давление в рабочей камере;  $S_0$  – эффективная быстрота откачки вакуумного объема при давлении  $P_{\text{пред}}$ .

Поток газов  $Q_{\text{изд}}$  можно определить по формуле

$$Q_{\text{изд}} = \frac{m \cdot q_{\text{изд}}}{t} \cdot n \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (1.46)$$

где  $m$  – масса обрабатываемых изделий, кг;  $q_{\text{изд}}$  – удельное газовыделение из материала обрабатываемых изделий при данной температуре, ( $\text{м}^3 \text{Па}$ )/кг (значения величины удельного газовыделения  $q_{\text{изд}}$  для материалов при различных температурах являются справочными данными);  $n$  – коэффициент, учитывающий неравномерность процесса газовыделения, обычно  $n = 1,5 - 3$ .

Поток газов  $Q_{\text{ст}}$  суммируется из потоков газов, выделяющихся со всех стенок вакуумной системы, обращенных в вакуумную полость, и определяется как

$$Q_{\text{ст}} = \sum g_{\text{газ}}^i \cdot A_i \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (1.46)$$

$$Q_{\text{нат}} = q_{\text{теч}} \cdot n \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (1.47)$$

$$Q_{\text{прон},i} = q_{\text{прон},i} P_i^{1/j} \frac{A}{b} \left[ \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (1.48)$$

где  $g_{\text{газ}}^i$  – скорость удельного газовыделения с поверхности стенки вакуумной системы после 1 ч отжига,  $(\text{м}^3 \text{Па})/(\text{м}^2 \text{с})$ ;  $q_{\text{теч}}$  – чувствительность течеискателя или минимально обнаруживаемый поток пробного вещества;  $q_{\text{прон},i}$  – удельный поток проницаемости данного газа,  $(\text{м}^3 \text{Па})/(\text{м}^2 \text{с})$ ;  $A$  – площадь стенки,  $\text{м}^2$ .

# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

## 1. ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ. ПРОВОДИМОСТЬ СЛОЖНОГО ТРУБОПРОВОДА

*Цель:* изучить методику режимов течения газов. Расчет проводимости сложного трубопровода.

Рассмотрим вакуумную систему, которая состоит из откачиваемого объекта, крана, трубопровода, насоса и монотрических датчиков. С началом работы насоса количество газа в системе уменьшается, следовательно, происходит понижение давления в вакуумной системе. Наличие трубопровода, крана и других элементов, оказывающих сопротивление потоку газа, обуславливает разность давлений  $P_0$  и  $P_n$  на концах элемента ( $P_0, P_n$ ).

### Режим течения газа в трубопроводах

Проводимость элемента вакуумной системы зависит от режима течения газа в трубопроводе.

Свойства газа и явления в вакууме различаются в зависимости от отношения  $\lambda/d$ , где  $\lambda$  – средняя длина свободного размера молекулы,  $d$  – диаметр трубопровода, при  $T = \text{const}$ . По мере откачки газа  $\lambda$  увеличивается и может наступить такой момент, когда  $\lambda > d$ . При  $\lambda \gg d$  столкновений между молекулами газа практически нет, и молекулы без столкновений проходят от стенки к стенке.

Свойства газа и различия в его поведении в зависимости от  $\lambda/d$  необходимо учитывать при разработке вакуумных систем, приборов, насосов, следовательно, соотношение  $\lambda/d$  положено в основу определения степени вакуума.

Если  $\lambda \ll d$  – низкий вакуум;

$\lambda \sim d$  – средний вакуум;

$\lambda \gg d$  – высокий вакуум.

В табл.2.1 приведено соотношение степени вакуума и области давлений. Таким образом, степень вакуума понятие относительное, и одному и тому же давлению могут соответствовать разные степени вакуума. Например, воздух в порах твер-

дого тела соответствует высокому вакууму и при нормальном давлении.

Таблица 2.1

Соотношение степени вакуума и области давлений

Степень вакуума	Низкий	Средний	Высокий	Сверхвысокий
Область давлений, Па	>100	100-10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>-5</sup>	<10 <sup>-5</sup>

Для вакуумных систем с характерными размерами трубопроводов сантиметры, степени вакуума характеризуются приблизительно значениями давлений, указанных в табл.2.1.

В самом начале процесса откачки при наиболее высоких давлениях может существовать инерционный режим течения газа, когда основную роль играют силы инерции движущейся массы газа. Обычно такой режим существует короткое время, в момент запуска некоторых вакуумных установок или при аварийных ситуациях, т.е. является не характерным для стандартных вакуумных систем.

Условие существования инерционного режима определяется критерием Рейнольда

$$R = \frac{Ud}{\eta}, \quad (1.1)$$

где  $U$  – средняя скорость потока газа;  $d$  – характерны диаметр элемента;  $\eta$ – коэффициент динамической вязкости.

При  $R \geq 2200$  существует инерционный режим.

Основную роль при низком вакууме играет вязкостный режим течения газа, при котором характер распределения скорости определяется силами внутреннего трения.

В процессе откачки давление уменьшается настолько, что при этом молекулы не сталкиваются друг с другом и такой режим течения газа называется молекулярным.

В среднем вакууме на течение газа оказывает влияние и внутреннее трение, и молекулярный перенос. Существующий при этом режим течения газа называется молекулярно-вязкостным.

Граничные условия существования различных режимов течения газа определяется по значениям критерия Кнудсена (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Критерии границ режимов течения газа ( $\lambda/d$ )

Режим	Граница, Па·м	
	Верхняя	Нижняя
Вязкостный	Атм. давление	$\lambda/d \leq 5 \cdot 10^{-3}$
Молекулярно-вязкостный	$\lambda/d > 5 \cdot 10^{-3}$	$\lambda/d \leq 1,5$
Молекулярный	$\lambda/d > 1,5$	$\infty$

При расчётах более удобно использовать  $P \cdot d$ , а не  $\lambda/d$ .

Известно, что при постоянной температуре  $\lambda \cdot P = \text{const} = \lambda'$ , где  $\lambda'$  – средняя длина свободного пробега при  $P = 1$  Па.

Значения  $\lambda'$  вычислены и табулированы.

Для воздуха при  $T = 298$  К  $\lambda' = 6,2 \cdot 10^{-3}$  мПа. Следовательно, при любом давлении для воздуха можно определить  $\lambda$  по уравнению

$$\lambda = \frac{6,2 \cdot 10^{-3}}{P}, \text{ м.} \quad (1.2)$$

Используя это выражение, приведем таблицу критериев режима течения газа через значение величины  $P \cdot d$  (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Критерии границ режимов течения газа ( $P \cdot d$ )

Режим	Граница, Па·м	
	Верхняя	Нижняя
Вязкостный	Атм. давление	$P \cdot d \geq 1,33$
Молекулярно-вязкостный	$P \cdot d < 1,33$	$P \cdot d \geq 2 \cdot 10^{-2}$
Молекулярный	$P \cdot d < 2 \cdot 10^{-2}$	$P \rightarrow 0$

Значения проводимости круглого трубопровода при разных режимах течения газа приведены в табл. 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4

## Проводимость трубопровода для воздуха

Режим	Проводимость газа круглого трубопровода, $\text{м}^3/\text{с}$	Проводимость газа круглого трубопровода для воздуха при $T = 298$ К, $\text{м}^3/\text{с}$
Вязкостный	$U_{TB} = \frac{\pi d^4}{128 \eta l} P_{cp}$	$U_{TB} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} P_{cp}$
Молекулярный	$U_{TM} = 38,2 \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{d^3}{l}$	$U_{TM} = 121 \frac{d^3}{l}$
Молекулярно-вязкостный	$U_{TMB} = b U_{TM} + U_{TB}$	---

Для технических расчетов  $b = 0,9$ .

## Проводимость отверстий для воздуха

Режим	Проводимость отверстия площадью $A$ , м <sup>3</sup> /с	Проводимость крана для воздуха при $T = 298$ К, м <sup>3</sup> /с
Вязкостный	$U_{OB} = 200A$	$U_{KB} = 0,6U_{OB}$
Молекулярный	$U_{OM} = 116A$	$U_{KM} = 0,1U_{OM}$
Молекулярно-вязкостный	$U_{OMB} = U_{OM} + \frac{U_{OB} - U_{OM}}{P_B - P_M} \times (P_i - P_M)$	$U_{KMB} = U_{KM} + \frac{U_{KB} - U_{KM}}{P_i - P_M} \times (P_i - P_M)$

$P_B$  – верхняя граница молекулярно-вязкостного режима;  
 $P_H$  – нижняя граница молекулярно-вязкостного режима;  
 $P_i$  – давление, для которого определяется режима течения газа;

$l$  – длина трубопровода.

При течении газа по трубопроводу необходимо учитывать влияние местных сопротивлений. Принимается, что влияние изгиба трубопровода под углом  $90^\circ$  учитывается удлинение трубопровода на 1.33 диаметре:

$$L_{расч} = I_{факт} + d \cdot i, \quad (1.3)$$

где  $i$  – число изгибов трубопровода.

Проводимость крана в вязкостном режиме можно считать равной (50 – 70) % проводимости отверстия в молекулярном режиме – (6 – 15) %.

Проводимость трубопровода при переходе от одной температуры к другой определяется формулой:

$$U_{T1}/U_{T2} = \sqrt{T_1/T_2}. \quad (1.4)$$

## Задание

1. Рассчитать проводимость трубопровода для воздуха при 293 К.(табл. 2.6)

2. При нанесении металлических пленок расстояние между испарителем и подложками равно  $d$ . Определить, при каком давлении нужно проводить процесс напыления, если режим течения газа в объеме должен быть молекулярным.

$d = 5, 8, 10, 15, 18, 20, 25, 29, 30, 35, 40, 45, 50$  см.

3. Рассчитать проводимость магистрали предварительной откачки при давлении  $P$ . Магистраль состоит из трубопровода  $d = 3,2$  см,  $l = 80$  см (90; 100; 120 см), электромагнитного клапана ДУ-32 (размер проходного сечения 3,2 см).

Вакуумная система состоит из: вакуумного объекта, пароструйного насоса, механического насоса, форбаллона, электромагнитных клапанов, датчиков измерения давления.

При проведении расчетов использовать данные, приведенные в табл. 2.2, 2.3, 2.4 и 2.5.

Таблица 2.6

Вариант	Диаметр, см	$P_1$ , Па	$P_2$ , Па	$P_3$ , Па
1	2	$10^2$	10	$8 \cdot 10^{-4}$
2	3,2	$5 \cdot 10^2$	1	$6 \cdot 10^{-4}$
3	4	$5 \cdot 10^2$	0,2	$2 \cdot 10^{-4}$
4	6	$3 \cdot 10^2$	0,3	$10^{-4}$
5	8	$2 \cdot 10^2$	0,1	$8 \cdot 10^{-5}$
6	10	$10^2$	$10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-5}$
7	12	90	$8 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-5}$
8	14	80	$6 \cdot 10^{-2}$	$10^{-5}$
9	16	70	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6}$
10	18	60	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-6}$
11	20	50	$10^{-2}$	$10^{-7}$
12	24	40	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-8}$
13	30	30	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-8}$
14	36	20	$10^{-3}$	$10^{-8}$

Таблица 2.7

Вари- ант	1	2	3	4	5	6	7
$P_1,$ Па	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$
Вари ри- ант	10	11	12	13	14	15	16
$P_2,$ Па	60	80	100	150	200	250	300

### Контрольные вопросы

1. Расчет режим течения газа для заданных  $P$  и  $d$ .
2. Расчет проводимость элементов.
3. Расчет проводимость сложного трубопровода.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ МАТЕРИАЛОВ

*Цель:* изучить процессы газовой выделении, проницаемости газа, расчет суммарного потока газовой выделении.

### 2.1 Растворимость газов

Одним из условий получения и сохранения высокого вакуума в системах и электровакуумных приборах является минимальное газовой выделение с поверхностей и из масс, граничащих с вакуумом. В обычных условиях все материалы содержат связанные газы и удерживаются на поверхности за счет сил физической адсорбции (адсорбированы); растворены в объеме материала (абсорбированы); содержатся в виде химических соединений (хемосорбированы); имеются в виде объемных включений в порах, трещинах (окклюдируются). Связанные газы при определенных условиях могут переходить в свободное состояние (десорбироваться) и повышать давление в замкнутом объеме.

Обычно в ходе откачки высоковакуумные системы и электровакуумные приборы подвергаются обезгаживанию. В каждом конкретном случае следует рассматривать пару «материал - газ» и намечать соответствующие пути освобождения материала от газа.

В зависимости от способа получения, хранения и обработки материалы могут содержать и выделять самые разнообразные газы: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и др.

Растворимость кислорода окиси углерода происходит с образованием химического соединения. Кислород поглощают все металлы (за исключением благородных).

Водород растворяется во многих металлах; в Ni, Fe, Co, Cu, Ag, Mo, W и Pt растворимость водорода с повышением температуры возрастает, а в Ti, Zr, Ta, Pt – уменьшается. В Au, Zn, Cd и In растворимость водорода вообще невелика. Он лучше всех газов растворится в металлах вследствие малого радиуса его атомов и ионов.

Азот поглощают металлы, образующие нитраты, а именно, Cr, Mo, W, Fe, Mn и Ta, Zr, Al.

Такие газы, как CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> (и H<sub>2</sub>O), обычно образуются на поверхности металла из составляющих их элементов.

Идентификацию газов, выделяющихся из материалов, осуществляют обычно с помощью масс-спектрометров.

Технологов интересует, кроме того, и количество газов, которое может выделиться из материалов в ходе их вакуумной обработки. В связи с тем, что газовыделение зависит от очень многих факторов и не всегда строго известна «история» материала, то нельзя полностью доверяться справочным сведениям по газовыделению, поэтому часто приходится оценивать газовыделение экспериментально.

Наиболее эффективным способом очистки материалов от газов считают высокотемпературный отжиг в вакууме или водороде. При этом решается также проблема снятия внутренних напряжений, появившихся в ходе предварительных механических и других обработок материалов.

Газы и металлы образуют растворы различных типов. Сравнительно небольшие по размерам атомы газов (водорода, азота) могут занимать устойчивое положение между большими атомами металла, образуя так называемые растворы внедрения. Если размеры атомов растворяющихся газов соизмеримы с размерами атомов металла, то образуются так называемые растворы замещения.

Перемещение растворенных атомов газов в объеме металла или к его поверхности происходит за счет диффузии решетки металла. Диффузия газов в растворах внедрения идет легче, чем в растворах замещения.

## 2.2. Проницаемость газов. Обезгаживание

Проницаемость газа через стенку  $Q_{\text{прон}}$  зависит от многих факторов. Выражение для коэффициента проницаемости газа через металлическую пластину толщиной  $d$ , по одну сторону которой имеется вакуум, а по другую – газ с давлением  $P$ , экспоненциально зависит от температуры  $T$ :

$$Q_{\text{прон}} = \frac{A}{b} g_0 \exp\left(-\frac{\Delta H}{jRT}\right) \cdot (P_1^{1/j} - P_2^{1/j}), \quad (2.1)$$

где  $g_0$  – константа проницаемости, зависящая от природы системы «газ – металл»;  $\Delta H$  – энергия активации процесса диффузии;  $P$  – давление;  $A$ ,  $d$  – площадь и толщина стенки;  $j = 1$  для неметаллов;  $j = 2$  для металлов.

Ясно, что обезгаживание следует вести при повышенных температурах, чтобы ускорить процессы десорбции и диффузии. Однако

в некоторых случаях при повышенных температурах процессы могут осложняться за счет химического взаимодействия газов с твердым телом.

На практике бывает довольно трудно различить, за счет какого процесса поглощается или выделяется газ. Более легко различима физическая адсорбция (десорбция), при которой газ поглощается или выделяется практически мгновенно. В общем случае для распознавания природы поглощения газа основываются на форме кривых зависимости количества выделившегося газа от времени при изотермическом обезгаживании. Если газовыделение обусловлено в основном диффузией газа из объема твердого материала, то скорость выделения газа приблизительно пропорциональна  $t^{-1/2}$ , (где  $t$  – время обезгаживания). Скорость выделения хемосорбированного газа пропорциональна  $t^{-1}$ , а образующегося при поверхностной термической диссоциации –  $t^{-2}$ .

Количество физически адсорбированного газа считают эквивалентным мономолекулярному слою:  $(0,3 - 0,5) \cdot 10^{-2}$  Па/см<sup>2</sup>. Этот газ удаляется за 2 – 3 мин. при нагреве до 200 – 300 °С. Величина истинной поверхности, участвующей в физической адсорбции, может в сотни раз превышать геометрическую поверхность твердого тела.

Повышение температуры отжига всегда ускоряет обезгаживание металлов и улучшает очистку поверхности. Однако при выборе температуры обезгаживания следует учитывать и возможность нежелательных структурных изменений металлов, приводящих к рекристаллизации и к снижению прочности, нарушению формоустойчивости деталей. Температура обезгаживания должна быть, по возможности, более высокой, по крайней мере, выше рабочей температуры деталей в приборах. Эта температура ограничивается иногда испарением материала (испарение считается заметным, если давление паров над металлом превышает 1000 Па). Максимальные температуры обезгаживания для наиболее распространенных металлов следующие: для вольфрама 1800 °С, для молибдена 950 °С, для меди 500 °С, для никеля 750 – 950 °С, для железа 1000 °С.

Известны следующие способы нагрева материалов при обезгаживании:

- в электрических и газовых печах;
- за счет непосредственного пропускания электрического тока через деталь;

- токами высокой частоты;
- путем бомбардировки деталей положительными ионами или электронами в вакууме (в последнем случае возможно разрушение химических соединений, находящихся на поверхности).

Методом прогрева в печи возможно обезгаживание всего прибора целиком. При этом происходит обезгаживание вспомогательных металлических деталей, которые в готовом приборе при его работе не нагреваются до высокой температуры.

Прогрев или прокаливание непосредственным пропусканием электрического тока удобно применять к деталям, которые используются как нагревательные элементы в готовом изделии (например, катоды, нити накаливания и т.п.). В частности, режим прокаливания катода для его обезгаживания. Но всегда в процессе откачки детали должны хотя бы некоторое время выдерживаться при температуре более высокой по сравнению с их рабочими температурами.

Прокаливанию токами высокой частоты в процессе откачки подвергаются наиболее ответственные металлические детали электровакуумного прибора. При этом индуктор, располагается снаружи (в воздушной атмосфере), а нагреваемая металлическая деталь - внутри вакуумной системы (обычно стеклянной).

При прокаливании электронной бомбардировкой используется кинетическая энергия электронов, эмитируемых накаленным катодом и устремляющихся под действием электрического поля к положительно заряженному (по отношению к катоду) электроду. Очевидно, температура прокаливания, достигаемая методом электронной бомбардировки, тем выше, чем выше положительный потенциал прокаливаемого электрода и чем больше электронный ток катода. Электронная бомбардировка является единственным эффективным методом обезгаживания внутренних электродов (например, сеток).

При пользовании методом электронной бомбардировки необходимо соблюдать такой режим, чтобы насос успевал откачивать выделяющиеся газы, иначе давление в приборе может возрасти до величины, достаточной для образования дугового разряда через газы (между катодом и прокаливаемым электродом).

При использовании данных методов обезгаживания необходимо придерживаться следующих общих правил:

- температуру прокаливаемой детали повышать постепенно;
- максимальную температуру прокаливания устанавливать, по возможности, более высокой, учитывая свойства данного металла;

– при прокаливании делать кратковременные перерывы для удаления выделяющихся газов, которые не только опасны с точки зрения возникновения дугового разряда в откачиваемом приборе, но и сильно снижают скорость обезгаживания.

При обезгаживании методом ионной бомбардировки в откачанный до высокого вакуума прибор впускается некоторое количество газа, не действующего химически на нагретый катод: например, можно пользоваться смесью водорода с аргоном при давлении 1000 Па. В атмосфере впущенного в откачанный прибор газа возбуждается разряд, и образующиеся при этом ионы газа, ускоряются под действием электрического поля к электродам прибора и нагревают, аж до высокой температуры. Получающийся при соприкосновении с нагретым катодом активный (одноатомный) водород является весьма эффективным восстановителем и, воздействуя на нагретые ионной бомбардировкой электроды, очищает их поверхность от окислов.

Способ обезгаживания ионной бомбардировкой применяется при откачке больших электровакуумных приборов (мощных генераторных ламп, рентгеновских трубок и т.п.).

## Расчетная часть

### Задание

Рассчитать суммарный газовый поток печи отжига изделий из меди, (молибдена, кобальта, никеля) после 1 ч. отжига. Рабочая камера печи отжига включает водоохлаждаемый колпак из нержавеющей стали площадью  $A_1$ , медные водоохлаждаемые электроды площадью  $A_2$ , нижнюю водоохлаждаемую плитку площадью  $A_3$ ; резиновый уплотнитель площадью  $A_4$  толщиной 1 см; вес изделия  $m$  кг; температура отжига  $T$ ; время отжига 4 ч (по варианту).

### Методика расчета суммарного газового потока

В общем случае суммарный газовый поток определяют четыре потока газов, поступающих в вакуумную систему:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{изд}} + Q_{\text{ст}} + Q_{\text{наг}} + Q_{\text{прон}} = P_{\text{пред}} \cdot S_0, \quad (2.2)$$

где  $Q_{\text{изд}}$  – поток газов, поступающих из обрабатываемых изделий;  $Q_{\text{ст}}$  – поток газов, выделяющийся со всех стенок, обращенных в вакуумную плоскость;  $Q_{\text{нат}}$  – поток газов, натекающих в вакуумную систему через неплотности;  $Q_{\text{прон}}$  – поток газов, поступающих в вакуумную систему за счет проницаемости;  $P_{\text{пред}}$  – предельное давление в рабочей камере;  $S_0$  – эффективная быстрота откачки вакуумного объема при давлении  $P_{\text{пред}}$ .

Поток газов  $Q_{\text{изд}}$  можно определить по формуле

$$Q_{\text{изд}} = \frac{m \cdot q_{\text{изд}}}{t} \cdot n \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (2.3)$$

где  $m$  – масса обрабатываемых изделий, кг;  $q_{\text{изд}}$  – удельное газовыделение из материала обрабатываемых изделий при данной температуре,  $(\text{м}^3 \text{Па})/\text{кг}$  (значения величины удельного газовыделения  $q_{\text{изд}}$  для материалов при различных температурах являются справочными данными);  $n$  – коэффициент, учитывающий неравномерность процесса газовыделения, обычно  $n = 1,5 - 3$ .

Поток газов  $Q_{\text{ст}}$  суммируется из потоков газов, выделяющихся со всех стенок вакуумной системы, обращенных в вакуумную полость, и определяется как

$$Q_{\text{ст}} = \sum g_{\text{газ}}^i \cdot A_i \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (2.4)$$

где  $g_{\text{газ}}^i$  – скорость удельного газовыделения с поверхности стенки вакуумной системы после 1 ч отжига,  $(\text{м}^3 \text{Па})/(\text{м}^2 \text{с})$ ;  $A_i$  – площадь поверхности стенок, обращенных в вакуумную полость, изготовленных из разных материалов.

Поток газов  $Q_{\text{нат}}$ , натекающих в вакуумную систему через соединения, обычно берется или по характеристикам элементов вакуумной системы, или равным чувствительности течеискателя, умноженной на число мест, которые могут быть источниками натекания:

$$Q_{\text{нат}} = q_{\text{теч}} \cdot n \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (2.5)$$

где  $q_{\text{теч}}$  – чувствительность течеискателя или минимально обнаруживаемый поток пробного вещества;  $n$  – число источников натекания.

Поток газов  $Q_{\text{прон}}$  суммируется из потока газов  $Q_{\text{прон}}^{\text{рез}}$ , протекающего в вакуумную камеру через резиновые уплотнители, и потока газов, протекающих через стенки нагреваемых элементов, отделяющих вакуумную систему от атмосферы (например, стакан для термопары):

$$Q_{\text{прон}} = \sum_i Q_{\text{прон,с}}^{\text{рез}} + \sum_i Q_{\text{прон,и}}^{\text{ст}} \left[ \frac{\text{м}^3 \text{Па}}{\text{с}} \right]; \quad (2.6)$$

$$Q_{\text{прон,и}} = q_{\text{прон,и}} P_i^{1/j} \frac{A}{b} \left[ \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}} \right], \quad (2.7)$$

где  $q_{\text{прон,и}}$  – удельный поток проницаемости данного газа,  $(\text{м}^3 \text{Па})/(\text{м}^3 \text{с})$ ;  $A$  – площадь стенки,  $\text{м}^2$ ;  $d$  – толщина стенки,  $\text{м}$ ;  $P_i$  – парциальное давление  $i$ -го газа ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ , ...).

Суммарный поток проницаемости, например через резиновый уплотнитель.

$$Q_{\text{прон}} = Q_{\text{прон N}_2} + Q_{\text{прон O}_2} + Q_{\text{прон H}_2} + \dots$$

## Контрольные вопросы

1. Методика расчета суммарного газового потока.
2. Как зависит проницаемость газов от давления?
3. Система «вакуум в вакууме».
4. Методика расчета  $Q_{\text{прон}}$  при различных температурах.
5. Методика расчета газового потолка из изделия.
6. Методы обезгаживания деталей в вакуумной системы.

### 3. ПАРОСТРУЙНЫЕ НАСОСЫ. СОГЛОСОВАНИЕ НАСОСОВ

*Цель работы:* ознакомиться с конструкцией пароструйных вакуумных насосов на примере диффузионного насоса ВН-461. Выбор основного и вспомогательного насосов. Согласование насосов.

*Оборудование.* Диффузионный насос.

#### 3.1. Теоретические сведения

В пароструйных насосах газ увлекается струей пара рабочей жидкости, которая легко может быть сделана сверхзвуковой.

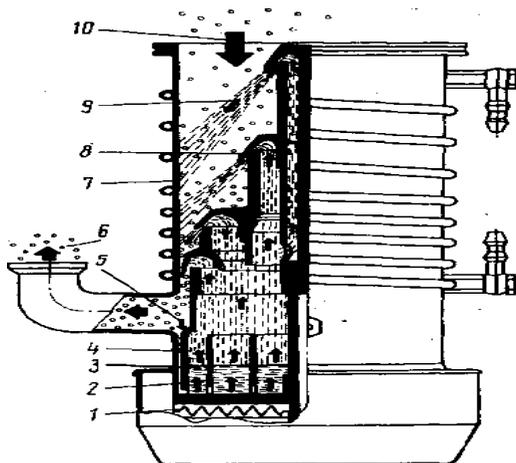


Рис. 3.1. Конструкция диффузионного насоса:

- 1 — нагреватель; 2 — выходная ступень откачки; 3 — резервуар с рабочей жидкостью; 4 — зазор для стекания масла в резервуар; 5 — сконденсированное на охлаждаемом корпусе масло; 6 — поток, откачиваемый форвакуумным насосом;
- 7 - корпус насоса; 8 — сопло; 9 — струя пара; 10 — откачиваемый поток газа

На рис. 3.1 показана схема пароструйного насоса. Зонтичная струя пара захватывает и увлекает молекулы газа, затем пар конденсируется на охлаждаемой стенке насоса, стекая в кипятильник, выделяемый газ и откачивают вспомогательным насосом. Затем рабочая жидкость в кипятильнике вновь испаряется, поднимается по паропроводу, через сопло опять образует струю пара и т. д. Выходной

патрубок пароструйного насоса должен откачиваться механическим насосом.

Поскольку оба насоса прокачивают один поток газа, их параметры должны удовлетворять условию. Быстроту откачки для каждого насоса берут при их входном давлении.

$$(p_{\text{вх}}S)_{\text{п.н}}=(p_{\text{вх}}S)_{\text{м.н.}} \quad (3.1)$$

Механизм увлечения газа различен в насосах эжекторных ( $10^5$ - $10$  Па), бустерных ( $10$ - $10^{-2}$  Па) и диффузионных ( $10^{-2}$ - $10^{-5}$  Па). Чем выше давление газа на входе насоса, тем больше должна быть плотность пара в струе. При больших скоростях истечения пара увеличение газа происходит в результате турбулентно-вязкостного перемешивания вихрей пара с частицами газа (эжекторные насосы). С понижением давления и уменьшением расхода пара возрастает роль вязкостного захвата в ламинарную струю (бустерные насосы).

При очень низких давлениях, когда свободный пробег молекул газа порядка диаметра насоса, работает только диффузионный механизм проникновения молекул газа в струю пара; плотность струи должна быть малой, а скорость струи — большой для эффективной передачи импульса молекулам газа (диффузионные насосы).

Важнейшей характеристикой пароструйных насосов является зависимость быстроты откачки от входного давления. Для диффузионных насосов она имеет плато в широком диапазоне давлений. При малых давлениях порядка предельного вакуума  $S(p)$  уменьшается из-за обратной диффузии, растворимости воздуха в масле, газоотделения деталей и т. д. При высоком давлении  $S(p)$  также уменьшается, так как повышение  $p_{\text{вх}}$  вызывает увеличение давления под струей и нарушение ее нормальной работы. Паспортные характеристики насосов относятся к номинальной мощности нагревателя  $W_0$ . От мощности, подводимой к насосу, зависят скорость и плотность струи пара. Зависимость быстроты откачки диффузионных насосов от рода газа сложна. Максимальная быстрота откачки, увеличивается с уменьшением молекулярного веса газа, так как  $S \sim v_{\text{г}} \sim M^{-1/2}$ . Однако обратная диффузия для легких газов больше и уменьшает быстроту откачки при убывании  $M$ . При различных режимах струи преобладает одна или другая тенденция (рис. 3.2).

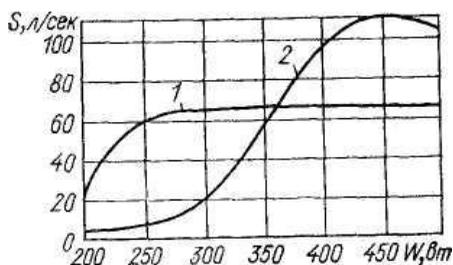


Рис. 3.2 Зависимость быстроты откачки диффузионного насоса НВО-40 от мощности нагревателя: 1 — по воздуху; 2 — по гелию

При большой плотности струи сильнее основная зависимость, и быстрота откачки, например, по гелию больше, чем по воздуху. При малой мощности нагревателя облегчается обратная диффузия и  $S$  убывает с уменьшением  $M$ .

Предельный вакуум диффузионных насосов зависит от обратного потока газа и от упругости паров рабочей жидкости.  $P_{\text{пред}}$  тем лучше, чем больше плотность и скорость струи, и тем хуже, чем меньше молекулярный вес газа. Для уменьшения обратной диффузии и растворимости газа в масле следует уменьшить давление под струей  $p_{\text{вых}}$ . С этой целью насосы делают многоступенчатыми.

Применяемое в насосах масло неоднородно по составу и содержит фракции с различной упругостью пара и температурой кипения. В многоступенчатых насосах применяется автоматическое фракционирование масла для понижения остаточного давления  $p_{\text{вх}}$  на входе и повышения допустимого давления  $p_{\text{вых}}$  на выходе насоса. Если в верхнее высоковакуумное сопло направить тяжелые фракции масла с низкой упругостью пара, то улучшится предельный вакуум насоса, а если в нижнее сопло направить легкие фракции с высокой упругостью пара, то струя станет более плотной и, следовательно, более имеет высокое давление на выходе.

**Рабочие жидкости** для диффузионных насосов должны обладать следующими свойствами: 1) небольшой упругостью паров при комнатной температуре для улучшения предельного вакуума; 2) большой упругостью паров при высокой температуре нагревателя для получения плотной струи. Из этих условий следует, что зависимость упругости паров от температуры должна резко возрастать; 3) малой теплотой парообразования для экономии мощности; 4) одно-

родностью состава для сохранения свойств рабочей жидкости при длительной работе; 5) термической стабильностью при рабочей температуре и стабильностью к окислению при контакте с воздухом, так как продукты окисления и разложения рабочей жидкости ухудшают вакуум; 6) небольшой растворимостью газов; 7) рабочая жидкость не должна взаимодействовать с материалами насоса.

Ртуть представляет собой жидкий металл с плотностью  $13,6 \text{ г/см}^3$  и температурой твердения  $-39 \text{ }^\circ\text{C}$ . Она активно образует амальгамы с цветными металлами и не реагирует с железом. Пары ртути ядовиты. Она однородна по составу, обладает хорошей термической стабильностью и мало растворяет газы. В диффузионных насосах применяют очищенную ртуть с примесями не более  $0,1 \%$ . Упругость паров ртути при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  сравнительно высока ( $0,266 \text{ Па}$ ), однако с использованием ловушек предельный вакуум ртутных насосов лучше, чем у масляных.

Для диффузионных насосов используют масло трех типов.

1. *Минеральное масло*. Это продукт вакуумной дистилляции нефтяных вазелиновых масел в диапазоне температур от  $180$  до  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ . Оно неоднородно по составу, представляет смесь углеводородов и обладает невысокой термической стабильностью и стойкостью к окислению. Горячее масло следует беречь от контакта с воздухом при аварийном прорыве атмосферы в установку. Минеральные масла сравнительно дешевы.

2. *Сложные эфиры* — однородные вещества — продукты синтеза фталевой и себациновой кислот. Их недостаток — сравнительно невысокая окислительно-термическая стабильность. Масла ОФ и ОС — изооктиловые эфиры указанных кислот. Предельный вакуум насосов с ними порядка  $10^{-6} \text{ Па}$ . К этим же маслам относятся полифениловые эфиры (ПФЭ) — полимеры из бензольных колец, соединенных через кислород.

3. *Кремний-органические масла* — это полимеры силоксановых цепочек вида  $-\text{Si-O-Si-O}-$  с прочной связью, обладающие очень высокой термоокислительной стабильностью. Эти масла менее других ухудшают свои свойства при контакте с атмосферой в нагретом состоянии.

В конструкциях паромасляных насосов для обеспечения фракционирования масла применяют отдельные концентрические паропроводы. При движении к центру днища насоса стекающего в кипящий масло из него сначала испаряются легкие фракции на

наименее нагретых краях днища; они попадают в нижнее сопло. В наиболее горячем центре днища испаряются тяжелые фракции и попадают в верхнее сопло.

Большой недостаток паромасляных насосов связан с миграцией масла: пары распространяются вверх от струи в откачиваемую систему и загрязняют ее.

Для ослабления миграции масла в диффузионных насосах применяют ловушки и маслоотражатели. В ловушках происходит сорбция молекул масла на поверхностях, охлаждаемых жидким азотом ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) или полупроводниковыми элементами. Существуют неохлаждаемые ловушки сорбционного типа.

Для увеличения допустимого выходного давления выходные патрубки насосов снабжают эжекторными соплами.

Существуют насосы с воздушным охлаждением от вентилятора, не требующие подвода воды.

На базе диффузионных насосов выпускают вакуумные агрегаты, представляющие собой удобный комплект откачного оборудования. Агрегаты крепят на раме, они содержат ловушку типа жалюзи, охлаждаемую жидким азотом, и створчатый затвор для герметичного отделения насоса от откачиваемого объема.

**Бустерные и эжекторные насосы.** Бустерные насосы предназначены для откачки сравнительно большого количества газа в промежуточном диапазоне давлений  $10^{-2}$ - $10^3$  Па. У высоковакуумных диффузионных насосов выходная ступень обычно эжекторного типа и помещается в выходном патрубке для получения высокого допустимого давления на выпуске  $p_{\text{вып}}$ . Однако в одном насосе с общим нагревателем трудно получить струи с сильно различающимися плотностями, поэтому выходную струю выносят в отдельный насос с более мощным нагревателем и более летучим маслом, что позволяет значительно повысить допустимое давление на выходе. Обычно крупные диффузионные насосы откачивают такой большой поток газа, что при необходимом низком давлении на их выходе  $p_{\text{д.н}}^{\text{вых}} = p_{\text{м.н}}^{\text{вх}}$  из-за малой быстроты откачки механических насосов трудно обеспечить выполнение условия (3.1). Эта трудность устраняется промежуточным бустерным насосом, включаемым последовательно по схеме ДН→БН→МН.

Бустерные насосы отличаются от диффузионных повышенным максимальным давлением выпуска (примерно 40-330 Па вместо  $\sim 13$  Па) и характеристикой быстроты откачки, смещенной в область бо-

лее высоких давлений. При этом легко выполняется условие для откачиваемых потоков газа

$$(p_{\text{вх}}S)_{\text{д.н}} = (p_{\text{вх}}S)_{\text{б.н}} = p_{\text{вх}}S_{\text{м.н}}. \quad (3.2)$$

В бустерных насосах используют нагреватели с повышенной мощностью, более летучие масла и более плотные струи. Например, для насосов на 500 л/с потребляемая мощность равна: для диффузионного Н-5С — 1 кВт; для бустерного БН-3 — 3,5 кВт

Бустерные насосы применяют самостоятельно (без диффузионных) в тех случаях, когда необходимо откачивать большое количество газа при не очень низком давлении (порядка  $10^{-2}$  Па в технологических объемах).

В эжекторных насосах применяют прямоточные сопла в виде трубок с коническим расширением (диффузором) для получения сверхзвуковых скоростей струи пара.

## 2. Особенности эксплуатации диффузионных насосов

Миграция паров рабочей жидкости для масляных диффузионных насосов может достигнуть нескольких кубических сантиметров в час. Наличие загрязнений рабочей жидкости и миграции продуктов крекинга приводит к снижению предельного вакуума, загрязнению откачиваемого объема и к уменьшению количества рабочей жидкости в подогревателе, что ограничивает срок службы насоса без вскрытия.

Для нормальной работы диффузионного насоса требуется определенная мощность подогрева кипятильника. При снижении мощности уменьшается плотность струи масла у сопел, снижается быстрота откачки насоса, возникают колебания давления в откачиваемом объеме. При увеличении мощности подогрева приходится иметь дело также с нестабильностью давления и с резким возрастанием миграции масла. Кроме того, срок службы насоса уменьшается.

Возможные неисправности диффузионных насосов и способы их устранения сведены в следующую

Неисправность	Возможная причина	Метод устранения
Резкое повышение давления, доходящее до давления предварительного разрежения	Значительная течь в вакуумной системе	Перекрыть вентиль, соединяющий вакуумную систему с пароструйным насосом, и оценить натекание по скорости возрастания давления в системе. Определить место течи и устранить течь
	Перегорание спирали электронагревателя	Отключить питание электронагревателя, проверить и заменить спираль
	Низкая температура масла в насосе	Проверить мощность, потребляемую электронагревателем, и довести ее до заданной в паспорте величины
Малая производительность насоса	Давление на стороне предварительного разрежения выше наибольшего выпускного давления	Проверить, нет ли течи со стороны трубопровода предварительного разрежения и достаточна ли производительность насоса предварительного разрежения. Устранить течь или установить насос с большей производительностью
	Низкая температура масла в насосе	Проверить мощность, потребляемую электронагревателем, и довести ее до заданной в паспорте величины
Плохой предельный вакуум	Неправильная сборка паропровода	Выключить электронагреватель, дождаться, пока насос полностью остынет, после чего разобрать и проверить, правильно ли установлены зазоры у сопел и нет ли перекоса паропровода
	Течь в вакуумной системе	Перекрыть вентиль, соединяющий вакуумную систему с пароструйным насосом, и оценить натекание по скорости возрастания давления в системе. Определить место течи и устранить ее
Плохой предельный вакуум	Загрязнения на стенках вакуумной системы и насоса	Разобрать вакуумную систему и промыть ее отдельные части. Чистку деталей вакуумной системы и насоса следует производить с помощью растворителей: бензина, ацетона, эфира
	Масло загрязнено примесями с высокой упругостью паров	Если после нескольких часов непрерывной работы вакуум в системе не улучшается, отсоединить насос от вакуумной системы и сменить масло
	Плохое охлаждение	Проверить подачу воды и ее температуру
Плохой предельный вакуум	Перегрев насоса	Уменьшить мощность нагревателя и проверить подачу воды
	Недостаток масла в насосе	Отсоединить насос от вакуумной системы и добавить масла до необходимого количества

## Ловушки. Назначение и основные требования, предъявляемые к ловушкам

Ловушки представляют собой устройства, предназначенные для улавливания паров или газов с целью предотвращения их проникновения из одной части вакуумной системы в другую и для снижения их парциального давления. Так, при откачке объема парортутным диффузионным насосом, из которого поступают в вакуумную систему насыщенные пары рабочей жидкости, имеющие давление 0,1 Па ( $10^{-3}$  мм рт. ст.), для получения более высокого вакуума прибегают к интенсивной их конденсации (вымораживанию) при помощи ловушек с охлаждающими веществами (хладагентами).

Обратным потоком называют поток паров рабочей жидкости, который поступает в откачиваемый объем, помимо естественного испарения. Обычно величина обратного потока выражается в мг/(см<sup>2</sup>·ч), т. е. количеством паров рабочей жидкости, поступающих в откачиваемый объем в единицу времени с единицы поверхности входного сечения насоса.

Основными техническими параметрами ловушки являются ее *защитная способность* и *удельная проводимость*.

*Защитной способностью* ловушки  $\beta$  называется отношение количества паров рабочей жидкости, поступающих из насоса в откачиваемый объем в единицу времени с ловушкой и без нее.

Часто качественное сравнение ловушек разных типов производят не по отношению  $\beta$ , а по величине обратного потока паров рабочей жидкости.

*Удельной проводимостью* ловушек  $U_{\text{уд.лов}}$  называется отношение полной проводимости ловушки  $U_{\text{лов}}$  к площади ее входного отверстия  $A$ :

$$U_{\text{уд.пов}} = \frac{U_{\text{пов}}}{A}. \quad (3.3)$$

При конструировании ловушек в зависимости от их назначения к ним предъявляется ряд требований:

1. Ловушки должны хорошо защищать откачиваемый объем от проникновения паров, т. е. должны обладать максимальной защитной способностью.

2. Ловушки должны как можно меньше снижать быстроту действия насоса. Правильно сконструированная ловушка снижает быстроту действия насоса не больше, чем на 30-40 %.

Обычно хорошо сконструированная ловушка имеет  $U_{\text{вд.лов}}$ , равную 3-4 л/с·см<sup>2</sup>, будучи смонтированной в трубопроводе с диаметром проходного сечения, равным 100 мм, уменьшает быстроту действия пароструйного насоса, имеющего  $S_n = 100$  л/с, примерно на 30 %.

3. Ловушки должны быть легкоразборными или давать доступ к защитным элементам для их периодической очистки.

4. Ловушки, применяемые в сверхвысоковакуумных системах, должны допускать прогрев до 450° С с целью обезгаживания.

5. Конструкции охлаждаемых ловушек должны обеспечивать малые скорости расхода хладагента.

### **Механические ловушки**

Применяются неохлаждаемые механические ловушки (маслоотражателей) или ловушки, охлаждаемых проточной водой.

На рис. 3.3 изображен охлаждаемый водой колпачок, который служит для предотвращения попадания паров рабочей жидкости, выбрасываемых из струи высоковакуумного сопла пароструйного насоса, в откачиваемый объем.

Колпачок устанавливается над верхним соплом насоса. Обычно такие колпачки применяются одновременно с охлаждаемой ловушкой; при этом поток паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объем может быть снижен в  $10^2$ - $10^3$  раз.

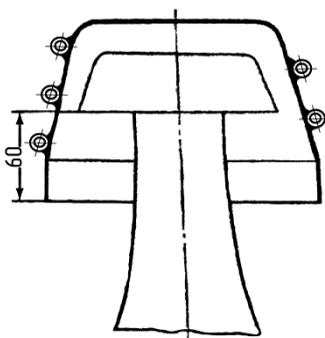


Рис. 3.3. Водоохлаждаемый колпачок, помещенный над верхним соплом пароструйного насоса

### **Низкотемпературные охлаждаемы ловушки. Ловушки с хладагентом**

Ловушки, охлаждаемые до низких температур, не только более надежно предотвращают проникновение паров рабочей жидкости в откачиваемый объем, но и улавливают пары и газы, имеющиеся в откачиваемом объеме, тем самым снижая давление в нем.

В отечественной промышленности для охлаждения ловушек чаще всего применяют жидкий азот ( $-196^{\circ}\text{C}$ ).

В отдельных промышленных установках для охлаждения ловушек применяются непрерывная циркуляция фреона-13 или фреона-22 или микроохладители, использующие расширение воздуха в поршневой машине.

Для конденсации, отражения и вымораживания паров рабочей жидкости в лабораторной практике и в стеклянных вакуумных установках широко применяются ловушки, изготовленные из стекла.

Ловушка, изображенная на рис. 3.4, *а*, предназначена для работы со стандартным стеклянным сосудом Дьюара, в который погружают цилиндрическую часть ловушки. В ловушку, показанную на рис. 3.4, *б*, жидкий азот наливают непосредственно во внутреннюю шаровидную полость.

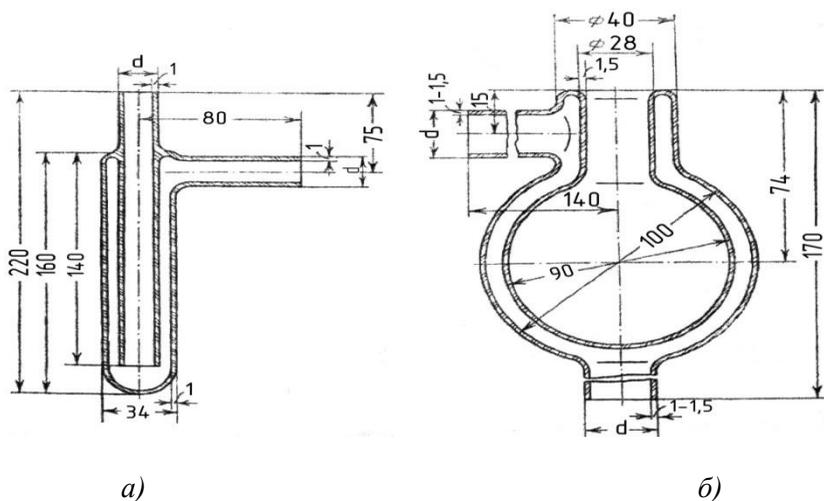


Рис. 3.4. Стекланные азотные ловушки: а) применяется с сосудом Дьюара; б) шаровая

На рис. 3.5 представлена жалюзийная охлаждаемая ловушка, которая используется в большинстве отечественных вакуумных агрегатов.

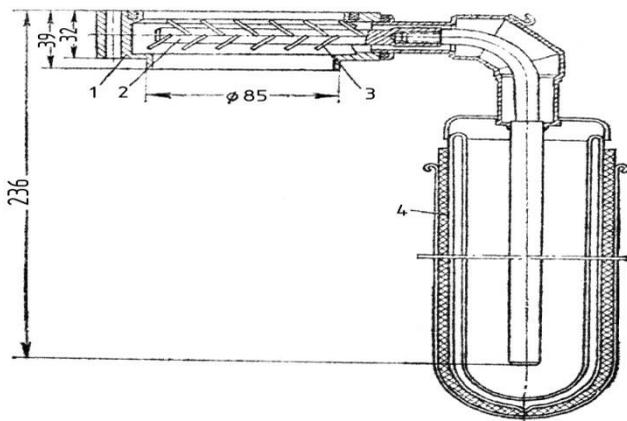


Рис. 3.5. Жалюзийная азотная ловушка: 1 - корпус; 2 - медный хладопровод; 3 - медные защитные элементы; 4 - сосуд Дьюара

Защитные элементы 3 ловушек типа ДУ-86 и ДУ-160 охлаждаются с помощью медного хладопровода 2, конец которого опущен в сосуд Дьюара 4 с жидким азотом. В ловушках ДУ-260, ДУ-350 и ДУ-500 применяется азотный питатель, который автоматически осуществляет подачу жидкого азота из сосуда Дьюара в полость хладопровода.

### **Высоковакуумные ловушки**

Не смотря на то, что охлаждаемые ловушки обеспечивают достаточно надежную защиту откачиваемого объема от попадания паров рабочей жидкости, их несомненным недостатком является необходимость в постоянной подаче охлаждающего вещества (хладагента).

Высокая адсорбционная способность некоторых пористых веществ — адсорбентов (цеолита, активированной окиси алюминия, активированного древесного угля) по отношению к парам масла дает возможность создавать эффективные адсорбционные ловушки.

В ловушке, показанной на рис. 3.6, в качестве адсорбента используется цеолит 13X. В нижней части корпуса ловушки помещен механический маслоотражатель 3, охлаждаемый водой. Адсорбент 1 размещается в полости, образованной стенкой корпуса ловушки и металлической сеткой. В центре корпуса на трубках 2, внутри которых помещены нагревательные элементы, подвешена корзина из металлической сетки, также заполненная адсорбентом. Подготовка ловушки к работе состоит в ее прогреве в вакууме до температуры примерно 350° С в течение 3 ч. Применение этой ловушки дает возможность получить в откачиваемом объеме безмасляный вакуум.

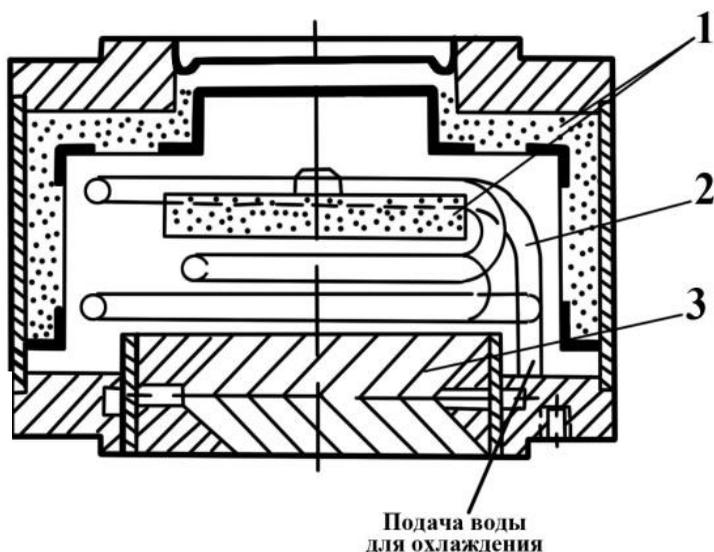


Рис. 3.6. Адсорбционная цеолитовая ловушка:  
 1 – адсорбент (цеолит 13);  
 2 – трубка с нагревательным элементом внутри; 3 – маслоотражатель

### 3. Расчетная часть

**Выбор и согласование насосов.** По заданному предельному давлению в вакуумной камере  $P_{\text{пред}}$  и суммарному потоку газов, поступающих в вакуумную камеру, определить:

1. Тип и размер основного насоса.
2. Тип и размер вспомогательного насоса.

Методика расчета:

1. Выбор типа основного насоса, исходя из заданного предельного давления. Например, если  $P_{\text{пред}} = 10^{-3} - 10^{-4}$  Па, то в качестве основного насоса выбирается пароструйный диффузионный насос.

2. Определение эффективной быстроты откачки камеры  $S_0$  для заданного предельного давления  $P_{\text{пред}}$  и рассчитанного суммарного газового потока

$$S_0 = \frac{Q_{\Sigma}}{P_{\text{пред}}}; \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Определение скорости откачки диффузионного насоса. Быстрота действия насоса при проектном расчете выбирается из условия обеспечения рабочего давления в установленном режиме работы вакуумной системы:

$$S_{\text{н}}^{\text{осн}} = k S_0^{\text{осн}}.$$

где  $k$  — коэффициент использования насосов.

Для пароструйных и криогенных насосов  $k=2$ , для сорбционных насосов  $k=4$ , для механических —  $k=1,2$ .

При проектировании вакуумных установок с диффузионным насосом желательно, чтобы пропускная способность трубопровода  $U$ , соединяющего объект с пароструйным насосом, была равно скорости откачки насоса, т. е.  $U=S_{\text{н}}$ :

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_{\text{н}}} + \frac{1}{U}.$$

По техническим характеристикам насоса и рассчитанному значению  $S_{\text{н, расч}}^{\text{осн}}$  выбираем размер основного насоса. Выписываем основные технические характеристики выбранного насоса:  $P_{\text{пред}}$ ,  $P_{\text{нач}}$ ,  $P_{\text{вып}}$ ,  $P_{\text{раб}}^{\text{max}}$ ,  $P_{\text{раб}}^{\text{min}}$ ,  $S_{\text{н}}$ .

Быстрота действия выбранного насоса  $S_{\text{н}}^{\text{осн}} \geq S_{\text{н, расч}}^{\text{осн}}$ , а предельное давление насоса должно быть равно или меньше заданного в условии  $P_{\text{пред}}$  проектируемой установки.

4. Определение необходимости и типа вспомогательного насоса по техническим характеристикам основного насоса  $P_{\text{нач}}$ ,  $P_{\text{вып}}$ . Так, для пароструйных насосов  $P_{\text{нач}}$ ,  $P_{\text{вып}} < P_{\text{атм}}$ , т. е. требуется предварительное разрежение вакуумной камеры и на выпуске пароструйного насоса. Тип вспомогательного насоса выбирается из условия

$$P_{\text{пред}}^{\text{всп}} \leq P_{\text{нач}}^{\text{осн}}, P_{\text{вып}}^{\text{осн}}.$$

Очевидно, что для создания предварительного разрежения в пароструйных насосах используются механические или адсорбционные насосы.

Расчет параметров вспомогательного насоса основан на том, что максимальный поток откачиваемых газов должен быть одинаков для основного и вспомогательного насосов, соединенных последовательно, т. е.

$$Q_{\text{max}} = S_{\text{н}}^{\text{осн}} P_1^{\text{осн}} = S_{\text{н}}^{\text{всп}} P_2,$$

где  $S_{\text{н}}^{\text{осн}}$  и  $S_{\text{н}}^{\text{всп}}$  — эффективная быстрота откачки вспомогательного и основного насосов при давлении на входе в насосы  $P_1$  и  $P_2$  соответственно.

$$S_{\text{н, расч}}^{\text{всп}} = \frac{Q_{\text{max}}}{P_2}.$$

Давление на входе во вспомогательном насосе выбирается из условия

$$P_2 = (0,7 - 0,75)P_{\text{вып}}^{\text{осн}},$$

где  $P_{\text{вып}}^{\text{осн}}$  — выпускное давление основного насоса;  $Q_{\text{max}}$  — максимальный поток газа, который может быть удален основным насосом,

$$Q_{\text{max}} = P_{\text{раб, max}}^{\text{осн}} S_{\text{н}}^{\text{осн}},$$

где  $P_{\text{раб, max}}^{\text{осн}}$  — максимальное рабочее давление основного насоса.

Тогда

$$S_{\text{н, расч}}^{\text{всп}} = \frac{Q_{\text{max}}^{\text{осн}}}{0,7 \cdot P_{\text{вып}}^{\text{осн}}} \cdot k,$$

где  $k$  — коэффициент использования насоса.

Для механических насосов  $k=1,1-1,25$ .

По рассчитанным параметрам и техническим характеристикам механических насосов выбираем размер механического насоса из условий

$$P_{\text{пред}}^{\text{всп}} \leq P_{\text{нач}}^{\text{осн}}, P_{\text{вып}}^{\text{осн}},$$

$$S_{\text{н}}^{\text{осн}} \geq S_{\text{н, расч}}^{\text{всп}}.$$

### Задания

1. Изучить конструкцию, принцип работы, практические указания при эксплуатации паромаслянных насосов.

2. Для заданных суммарного потока газа выделения  $Q_{\Sigma}$ ? предельного давления  $P_{\text{пред}}$  (по варианту).

2.1. Определить тип и размер основного насоса.

2.2. Определить тип и размер вспомогательного насоса.

2.3. Согласовать насосы.

### Отчет должен содержать

1. Описание типов пароструйных насосов, область действия пароструйных насосов.
2. Схему конструкции пароструйного насоса.
3. Параметры и характеристики пароструйных насосов.
4. Характеристики рабочих жидкостей.
5. Факторы, определяющие  $P_{\text{пред}}$ ,  $S_n$  пароструйного насоса.
6. Порядок работы основного и вспомогательного насосов.
7. Расчет типа и размера основного и вспомогательного насосов по заданным предельному давлению  $P_{\text{пред}}$  и суммарному потоку газов  $Q_{\text{max}}$ , поступающих в вакуумную камеру.

### Контрольные вопросы

1. Какие марки масла применяют в диффузионных насосах?
2. Каков механизм захвата молекул откачиваемых газов в струю пара из сопла?
3. Какие различия существуют в конструкциях и характеристиках высоковакуумных и бустерных насосов?
4. Как изменяются характеристики насосов при попадании в горячее масло атмосферного воздуха?
5. Чем обусловлено требование запуска диффузионных насосов при давлении  $\sim 1$  Па?
6. Какая ступень в многоступенчатом паромасляном насосе определяет быстроту откачки?
7. Методика выбора типа и размера основного и вспомогательного насосов?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника [Текст]: учебник для вузов по специальности "Электронное машиностроение" направления "Электроника и микроэлектроника" / Л. Н. Розанов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2007. – 391 с.

2. Вакуумная техника [Текст]: справочник / К. Е. Демихов, и др.; общ. ред. Ю. В. Панфилов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2009. – 590 с.

3. Шешин, Е. П. Вакуумные технологии [Текст]: учеб. пособие / Е. П. Шешин. – Долгопрудный : Интеллект, 2009. – 504 с.

4. Интернет ресурсы (справочные данные).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Основные уравнения физики разряженных газов.....	3
2. Взаимодействие газов с твердыми телами.....	9
3. Теоретические основы откачки.....	12
Методические указания к выполнению практических работ	
...1. Элементы вакуумных систем. Проводимость сложного трубопровода.....	18
2. Исследование процессов газовыделения из материалов.....	25
3. Пароструйные насосы. Согласование насосов.....	33
Библиографический список .....	49

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических занятий по дисциплине  
«Вакуумная техника»  
для студентов направления подготовки  
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»,  
профиль «Микроэлектроника и твердотельная электроника»  
заочной формы обучения

Составители:

**Николаева** Елена Петровна  
**Николаева** Светлана Олеговна

В авторской редакции

Компьютерная верстка Е. Е. Лавлинской

Подписано к изданию \_\_.\_\_\_\_.2019.  
Уч.-изд. л.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14