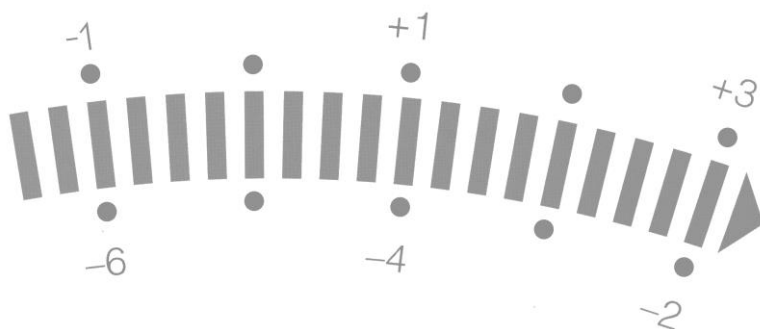


**Е.П. Шешин**

**10<sup>-7</sup>**



# **ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ**

**ФФКЭ / МФТИ  
2001**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава 1. Элементы вакуумных явлений . . . . .</b>	<b>4</b>
1.1. Основные понятия теории вероятности . . . . .	4
1.2. Распределение молекул по скоростям . . . . .	6
1.3. Давление газов . . . . .	9
1.4. Длина свободного пробега . . . . .	12
1.5. Понятие о степенях вакуума . . . . .	15
1.6. Явления переноса в газах . . . . .	17
1.7. Течение газа . . . . .	20
1.8. Поверхностные явления в вакууме . . . . .	32
<b>Глава 2. Получение вакуума . . . . .</b>	<b>36</b>
2.1. Вращательные насосы с масляным уплотнением . . . . .	39
2.2. Двухроторные насосы . . . . .	48
2.3. Турбомолекулярные насосы . . . . .	51
2.4. Пароструйные насосы . . . . .	54
2.5. Цеолитовые насосы . . . . .	62
2.6. Магниторазрядные насосы . . . . .	66
<b>Глава 3. Приборы для измерения давления . . . . .</b>	<b>72</b>
3.1. Абсолютные вакуумметры . . . . .	73
3.2. Тепловые вакуумметры . . . . .	76
3.3. Электронные ионизационные вакуумметры . . . . .	80
3.4. Магнитные газоразрядные вакуумметры . . . . .	83
<b>Глава 4. Течеискание . . . . .</b>	<b>87</b>
4.1. Манометрический метод . . . . .	88
4.2. Масс-спектрометрический метод . . . . .	89
<b>Глава 5. Элементы вакуумных систем . . . . .</b>	<b>102</b>
5.1. Разборные вакуумные соединения . . . . .	102
5.2. Электрические вакуумные вводы . . . . .	109
5.3. Смотровые окна . . . . .	110
5.4. Устройства для передачи движения в вакуум . . . . .	111
5.5. Коммутационная аппаратура . . . . .	115
Приложение 1 . . . . .	119
Приложение 2 . . . . .	120
Приложение 3 . . . . .	121
Список литературы . . . . .	122

## ГЛАВА 1

# ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ ЯВЛЕНИЙ

### 1.1. Основные понятия теории вероятности

Для дальнейшего изложения нам потребуются некоторые определения теории вероятности. Систематическое изложение этих вопросов выходит за рамки данного пособия, поэтому интересующийся читатель может обратиться к соответствующей литературе, например, [1].

#### Дискретные случайные величины

Рассмотрим случайную величину  $\xi$ , которая может принимать множество значений  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i, \dots$ . В результате конкретного измерения может быть получено определенное, но заранее неизвестное значение из множества допустимых. Проведем  $N$  измерений и обозначим через  $N_i$ , сколько раз величина  $\xi$  приняла значение  $\xi_i$ . Тогда можно ввести понятие *частоты* появления значения  $\xi_i$ :

$$v_i = \frac{N_i}{N}. \quad (1.1)$$

По определению *вероятностью* появления значения  $\xi_i$  называют

$$w_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N}. \quad (1.2)$$

Так как  $\sum_i N_i = N$ , то очевидно  $\sum_i w_i = 1$ .

*Средним значением (или медианой)* величины  $\xi$  называют

$$\langle \xi \rangle = M(\xi) = \sum_i \xi_i w_i. \quad (1.3)$$

*Среднее значение величины*  $g(\xi)$ , функционально зависящей от  $\xi$ , определяется по формуле

$$\langle g(\xi) \rangle = \sum_i g(\xi_i) w_i. \quad (1.4)$$

Для того чтобы описать разброс случайной величины, вводят понятие *дисперсии*:

$$D(\xi) = \sum_i (\xi_i - M(\xi)) w_i = \langle \xi^2 \rangle - \langle \xi \rangle^2, \quad (1.5)$$

а также *среднеквадратического отклонения*:

$$\sigma_\xi = \sqrt{D(\xi)}. \quad (1.6)$$

## Непрерывные случайные величины

Аналогично можно определить понятие вероятности для непрерывной величины  $\xi$ , определенной на множестве  $G$ . Вместо вероятности для непрерывной величины вводится понятие *плотность вероятности*  $f(\xi)$ , смысл которого состоит в том, что вероятность получить в результате измерения величину, заключенную в пределах от  $\xi$  до  $\xi + d\xi$ , есть

$$dw = f(\xi) d\xi. \quad (1.7)$$

Условие нормировки имеет вид  $\int_G dw = \int_G f(\xi) d\xi = 1$ .

*Средним значением (или медианой)* непрерывной величины  $\xi$  называют

$$\langle \xi \rangle = M(\xi) = \int_G \xi f(\xi) d\xi. \quad (1.8)$$

*Среднее значение величины*  $g(\xi)$ , функционально зависящей от  $\xi$ , определяется по формуле

$$\langle g(\xi) \rangle = \int_G g(\xi) f(\xi) d\xi. \quad (1.9)$$

*Дисперсия* непрерывной величины  $\xi$  выражается следующим образом:

$$D(\xi) = \int_G (\xi - M(\xi))^2 f(\xi) d\xi = \langle \xi^2 \rangle - \langle \xi \rangle^2. \quad (1.10)$$

## 1.2. Распределение молекул по скоростям

При соударении друг с другом или со стенками вакуумной камеры молекулы газа изменяют свои скорости, как по величине, так и по направлению. Тем не менее в состоянии равновесия систему молекул можно описать с вероятностной точки зрения. Математически такое описание определяется заданием функции плотности вероятности распределения молекул по скоростям.

Рассмотрим объем идеального газа, находящийся при температуре  $T$ . Функция распределения молекул по скоростям определяется формулой Максвелла (это так называемое *распределение Максвелла*):

$$dw_v = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left( -\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2 kT} \right) dv_x dv_y dv_z, \quad (1.11)$$

где  $v_x, v_y, v_z$  — декартовы компоненты скорости частицы,  $k$  — постоянная Больцмана, которая осуществляет связь между температурой и энергией,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К =  $1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/К,  $m$  — масса частицы.

Формула (1.11) определяет вероятность того, что молекула газа имеет скорость с декартовыми компонентами в интервалах от  $v_x$  до  $v_x + dv_x$ ; от  $v_y$  до  $v_y + dv_y$ ; от  $v_z$  до  $v_z + dv_z$ . Точный вывод формулы (1.11) выходит за рамки данного пособия. Интересующийся читатель может найти подробности в литературе [2, 3].

Формула (1.11) может быть представлена в виде произведения трех независимых сомножителей, каждый из которых

определяет распределение по соответствующей декартовой компоненте скорости, например, для компоненты  $x$ :

$$dw_{v_x} = \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{mv_x^2}{2kT} \right) dv_x. \quad (1.12)$$

Интервалу абсолютных скоростей от  $v$  до  $v + dv$  в пространстве скоростей  $v_x, v_y, v_z$  соответствует сферический слой объемом  $4\pi v^2 dv$ . Тогда вероятность того, что скорость молекулы лежит в диапазоне от  $v$  до  $v + dv$ , определяется формулой

$$dw_v = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left( -\frac{mv^2}{2kT} \right) v^2 dv. \quad (1.13)$$

Формулу (1.13) можно также получить, сделав в (1.11) переход от декартовых координат к сферическим и выполнив интегрирование по углам. В заключение получим распределение молекул по энергии. Для этого заменим в формуле (1.13)  $mv^2/2$  на  $E$ , а  $dv$  на  $dv = dE/\sqrt{2mE}$  соответственно:

$$dw_E = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{(kT)^{3/2}} \exp\left( -\frac{E}{kT} \right) \sqrt{E} dE. \quad (1.14)$$

Формулы (1.12) и (1.14) удобно представить в инвариантном виде, вводя безразмерную энергию  $x = \frac{E}{kT}$  и безразмерную скорость  $y = v\sqrt{\frac{m}{2kT}}$ :

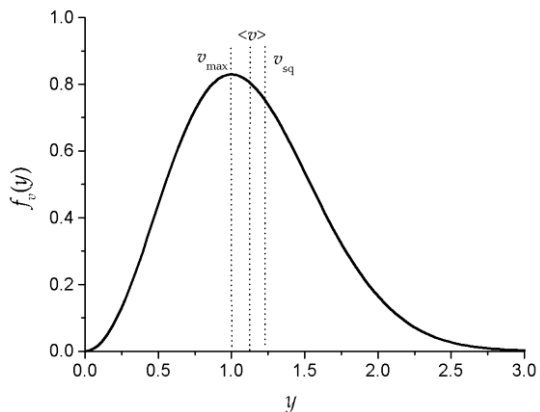
$$dw_E = f_E(x) dx \quad (1.15a)$$

$$dw_v = f_v(y) dy, \quad (1.15b)$$

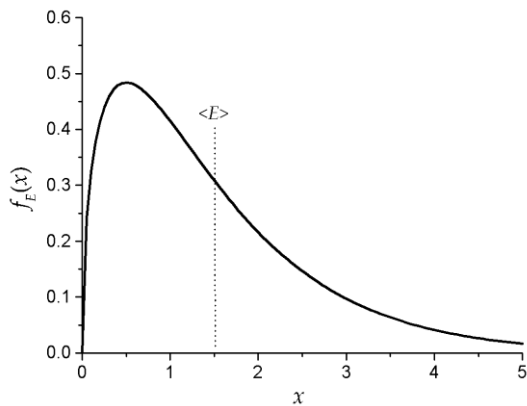
где  $f_E(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{x} \exp(-x)$ ,  $f_v(y) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} y^2 \exp(-y^2)$ , а графики этих функций приведены на рисунке 1.1.

Максимум функции  $f_v(y)$  соответствует значению  $y = 1$ , поэтому наиболее вероятная скорость равна

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}. \quad (1.16)$$



а)



б)

Рис. 1.1. Функции распределения Максвелла по скорости (а) и по энергии (б) в безразмерных единицах

Среднюю скорость молекул можно найти, воспользовавшись формулой (1.9) с учетом (1.13). В результате вычисления интеграла получим

$$v_{\text{ар}} = \langle v \rangle = \int_0^{\infty} v dw_v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (1.17)$$

что в безразмерных единицах соответствует  $y = 2/\sqrt{\pi} = 1,13$ .

Аналогично можно выразить среднеквадратичную скорость:

$$v_{\text{кв}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\int_0^{\infty} v^2 dw_v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}, \quad (1.18)$$

что в безразмерных единицах соответствует  $y = \sqrt{3/2} \approx 1,22$ .

Для того чтобы найти среднюю энергию, воспользуемся распределением (1.14). В результате получим

$$\langle E \rangle = \int_0^{\infty} E dw_E = \frac{3}{2} kT = \frac{mv_{\text{кв}}^2}{2}. \quad (1.19)$$

Некоторые интегралы необходимые для вычисления других средних значений приведены в приложении 1.

### 1.3. Давление газов

Под *давлением* газа понимают средний импульс, передаваемый единице площади стенки сосуда молекулами газа в единицу времени. Рассмотрим плоскую стенку сосуда, в который помещен газ. Предположим также, что молекулы газа не прилипают к стенке, а упруго отражаются. Выберем ось  $x$  перпендикулярно стенке сосуда, а оси  $y$  и  $z$  — произвольно в перпендикулярной плоскости.

Будем считать стенку бесконечно тяжелой по сравнению с массой молекулы, тогда изменение импульса молекулы  $\Delta p$ , налетающей на стенку со скоростью  $v_x$  вдоль оси  $x$  ( $y$  и  $z$  компоненты произвольны), составит

$$\Delta p = 2mv_x, \quad (1.20)$$

где  $m$  — масса молекулы.



Определим число молекул соударяющихся со стенкой сосуда площадью  $S$  в единицу времени. Рассмотрим множество молекул с проекцией скорости  $v_x$ . За время  $t$  до стенки долетят только молекулы, находящиеся на расстоянии менее  $v_x t$ , то есть в слое объемом  $Sv_x t$ . Здесь мы предполагаем, что молекулы не сталкиваются друг с другом. Для выполнения этого предположения необходимо выбрать  $t$  так, чтобы  $v_x t$  было меньше длины свободного пробега молекул между столкновениями. Согласно (1.12) концентрация молекул, имеющих скорости от  $v_x$  до  $dv_x$ , определяется выражением

$$dn = ndw_x = n \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right) dv_x. \quad (1.21)$$

Таким образом, для числа молекул, сталкивающихся со стенкой площади  $S$  за время  $t$ , можно написать:

$$N = \int_0^\infty Stv_x dn = \frac{Stn}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{2kT}{m}} \int_0^\infty y \exp(-y^2) dy, \\ N = Stn \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}}, \quad (1.22)$$

а число молекул, сталкивающихся с единицей поверхности стенки в единицу времени соответственно:

$$n_0 = n \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} = \frac{1}{4} nv_{\text{ар}}. \quad (1.23)$$

С учетом (1.20) и (1.21) для давления получим

$$p = \int_0^\infty \Delta p v_x dn = \frac{4nkT}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty y^2 \exp(-y^2) dy, \\ p = nkT. \quad (1.24)$$

Важно отметить, что использование для определения давления выражения (1.23) и подстановка в (1.20) среднего значения проекции скорости не являются корректными. В конечном результате это приведет к ошибке в числовом коэффициенте формулы (1.24) в  $\pi$  раз.

Уравнение (1.24) известно под названием *уравнение газового состояния*. Его можно записать в форме, называемой законом Менделеева–Клапейрона

$$pV = \nu RT, \quad (1.25)$$

где  $V$  — объем газа,  $\nu = N/N_A$  — количество молей газа,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  — число Авогадро (количество молекул в одном моле вещества),  $R = k N_A = 8,31 \text{ Дж} \cdot (\text{К} \cdot \text{моль})^{-1}$ . Из уравнения (1.25) следует, что при нормальных условиях (давление  $10^5 \text{ Па}$ , температура  $273 \text{ К}$ ) один моль идеального газа занимает  $22,4 \text{ л}$ .

В вакуумной технике обычно приходится иметь дело со смесями газов. Например, воздух представляет собой смесь, состав которой описан в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Состав сухого атмосферного воздуха

Газ	Состав, %	Парциальное давление, Па (при $p = 10^5 \text{ Па}$ )	Масса молекулы $\times 10^{-26}$ , кг
$\text{N}_2$	78,1	$7,81 \cdot 10^4$	4,65
$\text{O}_2$	21	$2,10 \cdot 10^4$	5,31
Ar	0,9	$9 \cdot 10^2$	6,63
$\text{CO}_2$	0,03	30	7,31
Ne	$1,8 \cdot 10^{-3}$	1,8	3,35
He	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-1}$	0,66
$\text{CH}_4$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	2,65
Kr	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	13,9
$\text{N}_2\text{O}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	7,3
$\text{H}_2$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	0,33
Xe	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$	21,8

Примечание.

В атмосфере имеются также пары воды. При  $25^\circ \text{C}$  и 50% влажности их парциальное давление составляет  $1,2 \cdot 10^3 \text{ Па}$ .

Для смеси газов справедлив *закон Дальтона*: общее давление смеси химически не взаимодействующих газов равно сумме парциальных давлений компонентов смеси.

Единицей давления в системе СИ является 1 Па (Паскаль). Это давление, создаваемое при воздействии силы 1 Н на площадь 1 м<sup>2</sup>. Наиболее распространённой внесистемной единицей давления в вакуумной технике является миллиметр ртутного столба (торр). Под давлением газа 1 мм рт.ст. понимается давление, которое создаёт столбик ртути высотой 1 мм при условии, что плотность ртути равна 13595,1 кг/м<sup>3</sup> (при  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а земное ускорение соответствует нормальному (9,80665 м/с<sup>2</sup> на широте 45°): 1 мм рт. ст. = 133,3 Н/м<sup>2</sup>. Соотношение между различными единицами давления даны в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Соотношения между единицами давления

Единицы давления	1 Па (Н/м <sup>2</sup> )	1 мм рт. ст. = 1 торр	1 дин/см <sup>2</sup>	1 атм (физ.)	1 кгс/см <sup>2</sup>
1 Па (1 Н/м <sup>2</sup> )	1	$7,5 \cdot 10^{-3}$	10	$9,87 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$
1 мм рт.ст. (1 торр)	$1,33 \cdot 10^2$	1	$1,33 \cdot 10^3$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$
1 дин/см <sup>2</sup>	0,1	$7,5 \cdot 10^{-4}$	1	$9,87 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-6}$
1 атм. (физ.)	$1,01 \cdot 10^5$	760	$1,01 \cdot 10^6$	1	1,03
1 кгс/см <sup>2</sup>	$9,8 \cdot 10^4$	735,56	$9,8 \times 10^5$	0,968	1

## 1.4. Длина свободного пробега

Рассмотрим монохроматический пучок частиц со скоростью  $v$ . Пусть пучок влетает в среду с постоянной концентрацией молекул  $n$ . Частицы пучка могут испытывать столкновение с молекулами, при этом будем считать их выбывшими из пучка. Обозначим направление вдоль пучка через  $l$ . Пусть  $\langle l \rangle$  — средняя длина свободного пробега между столкновениями, тогда вероятность столкновения одиночной частицы входного пучка при прохождении расстояния  $dl$  определяется выражением  $dl/\langle l \rangle$ . Изменение числа частиц  $dN$  в пучке при прохождении слоя от  $l$  до  $l + dl$  определяется выражением

$$dN = -N(l) \frac{dl}{\langle l \rangle}, \quad (1.26)$$

где  $N(l)$  — число частиц, приходящих в сечение  $l$ . Решая это дифференциальное уравнение, получим

$$N(l) = N_0 \exp\left(-\frac{l}{\langle l \rangle}\right), \quad (1.27)$$

где  $N_0$  — начальное число частиц в пучке.

Нормируя на начальное число частиц в пучке, можно получить выражение для плотности вероятности распределения частиц по длине свободного пробега

$$F(l) = \frac{1}{\langle l \rangle} \exp\left(-\frac{l}{\langle l \rangle}\right). \quad (1.28)$$

Тогда вероятность события, состоящего в том, что длина свободного пробега частицы не превышает  $L$ , определяется выражением

$$P(L) = 1 - \exp\left(-\frac{L}{\langle l \rangle}\right). \quad (1.29)$$

Для того чтобы выяснить, от чего зависит длина свободного пробега, рассмотрим модель абсолютно жестких шариков. Будем считать, что влетающие в среду частицы представляют собой жесткие шарики диаметром  $D$ , а молекулы среды имеют бесконечно малый размер. В рамках рассматриваемой модели будем называть *сечением* частицы ее поперечное сечение  $\sigma = \pi D^2/4$ . Учет конечного размера молекул среды  $D_0$  приводит к выражению для сечения  $\sigma = \pi(D+D_0)^2/4$ , а при  $D_0 = D$  получим соответственно:

$$\sigma = \pi D^2. \quad (1.30)$$

Если принять за диаметр  $D$  размер первой боровской орбиты  $2a_0 \approx 1 \text{ \AA}$ , то  $\sigma \approx 3.1 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ . Величина  $\pi a_0^2$  определяет характерный порядок атомных сечений и часто используется в качестве единицы измерения атомных сечений.

За время  $t$  частица входного потока проходит расстояние  $l = vt$ , и покрывает объем  $\sigma l$ . Среднее число молекул среды в этом

объеме или, что то же самое, среднее число столкновений  $\nu = n\sigma l$ . Среднюю длину свободного пробега определим как расстояние  $\langle l \rangle$ , при прохождении которого частица сталкивается в среднем с одной молекулой среды, то есть

$$\langle l \rangle = \frac{1}{n\sigma}. \quad (1.31)$$

Если скорость частицы  $v$  постоянна, то среднее время свободного пробега

$$\langle t \rangle = \frac{1}{n\sigma v}. \quad (1.32)$$

Воспользовавшись уравнением (1.24), можно представить среднюю длину свободного пробега в виде

$$\langle l \rangle = \frac{kT}{\sigma} \frac{1}{p}, \quad (1.33)$$

то есть, при постоянной температуре средняя длина свободного пробега обратно пропорциональна давлению.

Среднее эффективное сечение для воздуха (смеси газов см. таблицу 1.1) составляет  $\sigma \approx 62,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ . Тогда  $\langle l \rangle = 4,5 \cdot 10^{-3}/p$ , где  $p$  (торр),  $\langle l \rangle$  (см). Длина свободного пробега молекул воздуха при атмосферном давлении 760 торр и температуре 273 К (нормальные условия) соответственно  $\langle l \rangle = 6 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 60 \text{ нм}$ . Аналогичные параметры для других газов приведены в приложении 2.

Модель упругих шариков удовлетворительно выполняется для описания упругого взаимодействия медленных нейтральных молекул. При взаимодействии заряженных частиц с молекулами и при больших энергиях взаимодействующих частиц формула (1.30) не справедлива, а сечение зависит от энергии частиц. Однако полученная формула (1.31) имеет более широкую область применимости. Для описания взаимодействия произвольных частиц вводят понятие *эффективного сечения*  $\sigma(v)$ , которое в общем случае зависит от относительной скорости сталкивающихся частиц  $v$ . Эффективное сечение либо рассчитывают теоретически на основании известного потенциала взаимодействия частиц, либо измеряют экспериментально, например, определяя ослабление

пучка частиц в среде и вычисляя длину свободного пробега по формуле (1.27) или измеряя значение вязкости газов (взаимосвязь сечений и вязкости газов будет рассмотрена в следующих главах).

Если частица может взаимодействовать со средой по нескольким каналам, например, упруго рассеяться или ионизовать атом среды, то говорят об эффективном сечении определенного процесса  $\sigma_i$ , где  $i$  — порядковый номер процесса. Полное сечение, определяющее длину свободного пробега, задается очевидной формулой  $\sigma = \sum \sigma_i$ . При каждом столкновении вероятность  $P_i$  взаимодействия по определенному каналу есть

$$P_i = \frac{\sigma_i}{\sigma}. \quad (1.34)$$

Примеры сечений ионизации и возбуждения различных газов электронным ударом, а также упругие сечения приведены в приложении 3.

## 1.5. Понятие о степенях вакуума

Теперь, когда мы ввели понятие давления и длины свободного пробега можно ввести количественные характеристики, описывающие вакуум. В физике обычно под вакуумом понимают состояние газа, когда длина свободного пробега молекул много больше характерного размера задачи.

В технике вакуумом называют состояние газа, когда его давление ниже атмосферного. В технике различают четыре основных степени вакуума: низкий, средний, высокий и сверхвысокий. Для количественной оценки вводится число Кнудсена:

$$\text{Kn} = \frac{L}{\langle l \rangle}, \quad (1.35)$$

где  $L$  — характерный размер вакуумного объема,  $\langle l \rangle$  — средняя длина свободного пробега.

Область давлений, когда средняя длина свободного пути молекул много меньше характеристических размеров вакуумного

объема, например диаметра трубопровода, отвечает низкому вакууму. Низкий вакуум соответствует  $K_n \gg 1$ . При этом обмен энергией происходит исключительно между ближайшими молекулами. Такие условия проявляются в виде вязкости газа, а соответствующие процессы называются вязкостными.

Область давлений, когда средняя длина свободного пути молекул примерно равна характеристическим размерам вакуумного объема, получила название среднего вакуума. В этом диапазоне давлений столкновения молекул со стенками и друг с другом равновероятны. Средний вакуум отвечает  $K_n \sim 1$ .

В области высокого и сверхвысокого вакуума средняя длина свободного пути молекул много больше размеров вакуумного объема, и молекулы преимущественно сталкиваются со стенками сосуда. В этом случае каждая молекула выступает индивидуально, а процессы в газах называется молекулярными. В высоком вакууме  $K_n \ll 1$ .

Области сверхвысокого вакуума отличаются тем, что за характерное время рабочего процесса не происходит заметного изменения свойств поверхности, связанного адсорбцией остаточных газов.

Области давлений, обычно соответствующие тому или иному вакууму, представлены на рис. 1.2.

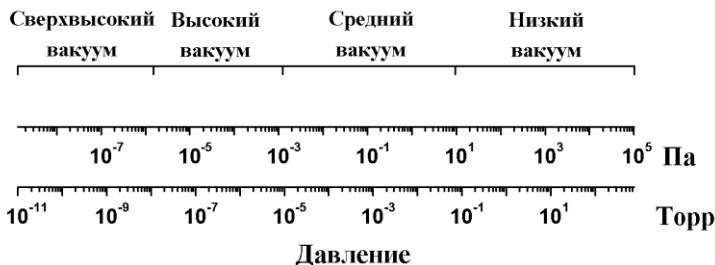


Рис. 1.2. Условное деление областей вакуума

## 1.6. Явления переноса в газах

При перемещении твёрдого тела со скоростью  $v_n$  за счёт передачи количества движения молекулам газа возникает сила внутреннего трения.

Весь газ между подвижной 1 и неподвижной 2 пластинами (рис. 1.5) можно разделить на слои толщиной  $l_0$ , где  $l_0$  — средняя длина свободного пробега. В плоскости  $x_0$  происходят столкновения молекул, вылетевших из плоскостей  $x'$  и  $x''$ . Изменение количества движения в результате одного столкновения равно  $2ml_0 dv_n/dx$ . Принимая, что в среднем в отрицательном и положительном направлениях оси  $x$  в единицу времени единицу площади в плоскости  $x_0$  пересекают  $nv_{ap}/4$  молекул, получим общее изменение количества движения в плоскости  $x_0$  в единицу времени:

$$0,5 \cdot mnLv_{ap} \frac{dv_n}{dx}. \quad (1.36)$$

Сила трения по всей поверхности переноса определяется общим изменением количества движения:

$$F = -\frac{1}{2}nmLv_{ap} \frac{dv_n}{dx} A = -\eta \frac{dv_n}{dx} A, \quad (1.37)$$

где  $A$  — площадь поверхности переноса. Коэффициент пропорциональности

$$\eta = mnv_{ap} L/2 = \rho v_{ap} L/2 \quad (1.38)$$

называют коэффициентом динамической вязкости, а отношение  $\eta/\rho$  — коэффициентом кинематической вязкости ( $\rho$  — плотность газа). Точное значение

$$\eta = 0,499 \cdot \rho v_{ap} L, \quad (1.39)$$



расчитанное согласно молекулярно-кинетической теории мало отличается от приближённого значения (1.39)

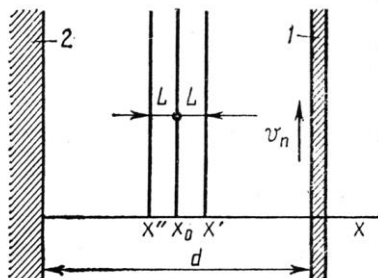


Рис. 1.5. Расчётная схема для определения коэффициента вязкости в газах при низком вакууме

Численные значения коэффициента  $\eta$  для некоторых газов при  $T = 273$  К приведены в табл. 1.3.

В области высокого вакуума сила трения пропорциональна молекулярной концентрации или давлению газа. Это объясняется тем, что молекулы газа двигаются между поверхностями переноса без соударений.

Таблица 1.3

	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	O <sup>2</sup>	CO <sub>2</sub>	Воздух
$\eta \cdot 10^5$ , Н·с/м <sup>2</sup>	0,88	1,75	1,70	2,20	1,40	1,70

Теплопередача в разрежённых газах может происходить за счёт трёх процессов: конвекции, теплопроводности и излучения. Конвективный теплообмен может быть либо естественным из-за силового воздействия гравитационного поля на газ, имеющий различную плотность вследствие температурных градиентов, либо вынужденным при наличии газовых потоков во время откачки вакуумных камер.

В области среднего и высокого вакуума роль конвективного теплообмена в общем балансе передачи тепла мала, и в расчётах им обычно пренебрегают. При низком вакууме конвективный теплообмен является основным способом теплопередачи.

Перенос тепла конвекцией в низком вакууме от поверхности нити, нагретой до температуры  $T_n$  к стенкам вакуумной камеры, имеющим температуру  $T$ , описывается уравнением Ньютона–Рихмана:

$$E_k = a (T_n - T) A, \quad (1.40)$$

где,  $a$  — коэффициент теплообмена;  $A$  — площадь поверхности нити.

Теплопередача за счёт теплопроводности может рассматриваться как явление переноса, аналогичное вязкости. Этот процесс характеризуется количеством тепла, отнесённым к одной молекуле газа:  $c_v m T$ , где удельная теплоёмкость газа при постоянном объёме

$$c_v = \frac{k}{(\gamma - 1)m}, \quad (1.41)$$

а  $\gamma = c_p/c_v$  — отношение теплоёмкости газа при постоянном давлении к теплоёмкости при постоянном объёме (для воздуха и двухатомных газов  $\gamma = 1,4$ ; для одноатомных  $\gamma = 1,66$ ; для трёх атомных  $\gamma = 1,3$ ).

Если концентрация газа  $n$  постоянна, то аналогично (1.37) запишем выражение для теплового потока (уравнение Фурье):

$$E_T = -\lambda \frac{dT}{dx} A, \quad (1.42)$$

где

$$\lambda = \frac{nmv_{ap} l_0 c_v}{2} = \eta c_v. \quad (1.43)$$

В молекулярно-кинетической теории, используя функцию распределения молекул по скоростям, получают для коэффициента теплопроводности  $\lambda$  более точное выражение:

$$\lambda = (9\gamma - 5)\eta c_v / 4. \quad (1.44)$$

Значения  $\lambda$ , рассчитанные по формулам (1.43) и (1.44) для воздуха, отличаются на 20%.

Теплопроводность газа, так же как и вязкость, не зависит от давления в области низкого вакуума и пропорциональна давлению при высоком вакууме.

Теплопередачу в вакууме излучением  $E_{\text{и}}$  можно определить

$$E_{\text{и}} = 5,7 \cdot E_{\text{е}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] E_{\text{г}}, \quad (1.45)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — температура на внешней и внутренней поверхностях переноса;  $E_{\text{г}}$  — геометрический фактор (для параллельных плоскостей и концентричных цилиндрических оболочек  $E_{\text{г}} = 1$ );  $E_{\text{е}}$  — приведённая степень черноты;

В высоком вакууме излучение является практически единственным способом передачи тепла и не зависит от давления газа.

Приведённые закономерности теплопередачи в газах при низких давлениях широко используются в вакуумной технике для расчёта нагревательных и охлаждающих устройств, а также для косвенных измерений давления в области среднего и низкого вакуума.

## 1.7. Течение газа

Стационарный газовый поток через элементы вакуумной системы является следствием существующей в них разности давлений, и рассчитывается по формуле

$$Q = U(p_1 - p_2), \quad (1.46)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  — давление на концах элемента вакуумной системы, а  $U$  — проводимость этого элемента. Проводимость элемента является коэффициентом пропорциональности между потоком и разностью давления и численно равна количеству газа, протекаю-

щему через элемент в единицу времени, при разности давлений на концах элемента, равной единице. Если выразить поток в единицах л·торр/с или м<sup>3</sup>·Па/с, то проводимость выразится соответственно в л/с и м<sup>3</sup>/с. Выражение потока в кг/с даёт для проводимости размерность кг/(Па·с).

Сопротивление элемента — это величина, обратная его проводимости

$$Z = \frac{1}{U}. \quad (1.47)$$

По аналогии с электрическими цепями в вакуумной технике при приближённом рассмотрении процессов течения газа принимается, что проводимость элемента не зависит от его расположения среди других элементов. Тогда для ряда  $i$  параллельно соединённых элементов с проводимостями  $U_i$  можно определить общую проводимость как

$$U_0 = \sum_{i=1}^N u_i, \quad (1.48)$$

где  $N$  — общее число элементов.

Для ряда последовательно соединённых элементов получим общую проводимость:

$$U_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{U_i}}. \quad (1.49)$$

Проводимость элемента вакуумной системы зависит от степени вакуума, при котором наблюдается течение газа. В низком вакууме проводимость растёт при повышении давления. В высоком вакууме она остаётся постоянной.

В низком вакууме основную роль играет вязкостный режим течения газа, при котором характер распределения скорости в поперечном сечении определяется силами внутреннего трения.

При высоком вакууме силы внутреннего трения в газах стремятся к нулю, и существует молекулярный режим течения газа, для которого характерно независимое перемещение отдельных молекул. В среднем вакууме на течение газа одновременно сказывается влияние внутреннего трения и молекулярного переноса. Существующий при этом режим течения называют молекулярно-вязкостным.

В качестве примеров рассмотрим течение газа для двух типов элементов вакуумных систем: отверстий и трубопроводов.

Под отверстием понимается трубопровод, длина которого значительно меньше диаметра, расположенный в стенке и разделяющий два объема с давлениями  $p_1$  и  $p_2$  соответственно.

При вязкостном режиме течения газа закон сохранения энергии для адиабатического истечения газа можно записать в виде равенства приращения кинетической энергии газа изменению его энтальпии

$$G \frac{\omega_{r^2}^2}{2} = G(I_1 - I_2), \quad (1.50)$$

где  $G$  — поток газа;  $\omega_{r^2}$  — скорость газа на выходе из отверстия;  $I_1$  и  $I_2$  — энтальпии газа до и после прохождения отверстия. Воспользовавшись тем, что  $I = c_p T$  перепишем уравнение сохранения энергии в виде

$$\frac{\omega_{r^2}^2}{2} = c_p T_1 \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right). \quad (1.51)$$

С учётом того, что  $pV = RT/M$ ,  $R/M = c_p - c_v$ ;  $\gamma = c_p/c_v$ ;  $V_1/V_2 = (p_2/p_1)^{1/\gamma}$ , где  $V$  — удельный объём газа, м<sup>3</sup>/кг, преобразуем (1.51):

$$\omega_{r^2} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} p_1 V_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right]}. \quad (1.52)$$

Поток газа через отверстие (кг/с) с учётом записанного выражения для  $\omega_{r^2}$ :

$$G = \omega_{r^2} A / V_2 = \psi \sqrt{\frac{p_1}{V_1}} A, \quad (1.53)$$

где  $\psi = r^{1/\gamma} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} [1 - r^{(\gamma-1)/\gamma}]}$ ;  $r = p_2/p_1$ ,  $A$  — площадь отверстия.

Из уравнения газового состояния следует, что

$$V_1 = RT_1 / (Mp_1). \quad (1.54)$$

Тогда (1.53) можно переписать в виде

$$G = \psi \cdot A p_1 \sqrt{M / RT_1}. \quad (1.55)$$

В условных единицах массы Па·м<sup>3</sup>/с выражение для газового потока (1.55) будет иметь следующий вид:

$$Q = (GRT_1) / M = \psi \cdot A p_1 \sqrt{(RT_1) / M}. \quad (1.56)$$

При вязкостном режиме течения газа уменьшение отношения давления с обеих сторон отверстия  $r = p_2/p_1 \leq 1$  приводит к тому, что количество газа, протекающего через диафрагму, и конечная скорость потока в области  $p_2$  увеличиваются до тех пор, пока отношение  $p_2/p_1$  не достигнет критического значения, соответствующего скорости звука. Если процесс истечения адиабатический, то критическое значение:

$$r_k = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}. \quad (1.57)$$

Для воздуха  $\gamma = 1,4$ , поэтому  $r_k = 0,528$ ; для одноатомного газа  $\gamma = 1,67$ ;  $r_k = 0,437$ , для трёхатомного газа  $\gamma = 1,4$ ;  $r_k = 0,546$ .

Дальнейшее уменьшение отношения давления не изменяет количества протекающего газа. В области отношений  $p_2/p_1$  выше критического проводимость определяется выражением

$$U_{\text{об}} = \frac{Q}{p_1 - p_2} = \psi \frac{A}{1-r} \sqrt{\frac{RT_1}{M}}. \quad (1.58)$$

Для воздуха и других двухатомных газов при  $\gamma = 1,4$  получим

$$U_{\text{об}} = 241 \cdot r^{0,7} \sqrt{\frac{T_1}{M}} \sqrt{1-r^{0,3}} \frac{A}{1-r}, \quad (1.59)$$

где  $M$  — молекулярная масса, кг/кмоль;  $A$  — площадь отверстия,  $\text{м}^2$ ;  $U_{\text{об}}$  выражено в  $\text{м}^3/\text{с}$ .

При комнатной температуре для воздуха ( $M = 29$  кг/кмоль), если  $A$  выражено в  $\text{м}^2$ , получим для проводимости отверстия

$$\begin{aligned} U_{\text{об}} &= 766 \cdot r^{0,7} \sqrt{1-r^{0,3}} \frac{A}{1-r}, \text{ при } 1 \geq r \geq 0,52, \\ U_{\text{об}} &= 200 \frac{A}{1-r}, \text{ при } 0,52 \geq r \geq 0,1, \\ U_{\text{об}} &= 200 A, \text{ при } 0,1 \geq r \geq 0. \end{aligned} \quad (1.60)$$

Так как отношение давлений  $r$  заранее неизвестно, то расчет нужно вести методом последовательных приближений. При проектировочном расчете с большим запасом можно принять в первом приближении, что  $U_{\text{об}} = 200 A$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$  и не зависит от  $r$ . То-

гда для круглых отверстий  $U_{\text{об}} = 160 \cdot d^2 \text{ м}^3/\text{с}$ . Если  $d$  выражено в см, то  $U_{\text{об}} = 16 \cdot d^2$ , л/с. В обычных вакуумных системах, работающих в стационарном режиме чаще всего  $r \geq 0,8$ , это соответствует проводимости  $U_{\text{об}} = 830 \text{ А}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , что примерно в 4 раза выше, чем первое приближение.

Проводимость отверстия в молекулярном режиме рассчитывается по формуле

$$U_{\text{ом}} = \frac{Q}{p_1 - p_2} = \frac{GkT}{m(p_1 - p_2)}, \quad (1.61)$$

где  $G = G_1 - G_2$ ;  $G_1$  и  $G_2$  — массовые потоки через отверстие, проходящие навстречу друг другу. С учётом того, что  $G_1 = n_1 m v_{\text{ар}1} A/4$ , а  $G_2 = n_2 m v_{\text{ар}2} A/4$ , для проводимости можно записать при  $T = \text{const}$

$$U_{\text{ом}} = 36,4 \cdot A \sqrt{T/M}, \quad (1.62)$$

где  $M$  в кг/моль,  $T$  в К,  $A$  в  $\text{м}^2$ ,  $U_{\text{ом}}$  в  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Расчёт проводимости отверстия для воздуха ( $M = 29 \text{ кг/кмоль}$ ) при комнатной температуре  $T = 298 \text{ К}$  из (1.62) даёт в результате

$$U_{\text{ом}} = 116 \cdot A. \quad (1.63)$$

Так как для круглого отверстия  $A = \pi d^2/4$ , то  $U_{\text{ом}} = 91 d^2 \text{ м}^3/\text{с}$ ; если  $d$  выражено в см, то  $U_{\text{ом}} = 91 d^2 \text{ л/с}$ .

В области молекулярно-вязкостного режима течения можно пользоваться приближённой формулой:

$$U_{\text{омв}} = U_{\text{ом}} b + U_{\text{об}}, \quad (1.64)$$



где  $b = \left(1 + 2.5 \frac{d}{2l_0}\right) / \left(1 + 3.1 \frac{d}{2l_0}\right)$ , которая справедлива также

в областях молекулярного и вязкостного режимов течения газа.

Для воздуха при комнатной температуре имеем

$$U_{\text{OMB}} = 117 \cdot Ab + U_{\text{ОВ}}, \quad (1.65)$$

причём коэффициент  $b$  на границе с вязкостным режимом равен 0,8, а на границе с молекулярным – 1,0. Для приближённых расчётов можно принять  $b = 0,9$ .

В области низкого вакуума при вязкостном режиме течения газа средняя длина свободного пути молекул газа  $l_0$  значительно меньше диаметра трубопровода. Слой газа у поверхности трубопровода остаётся неподвижным, а остальные слои толщиной  $l_0$  движутся в условиях стационарного потока с постоянной скоростью. Ограничимся рассмотрением трубопровода с круглым поперечным сечением.

При стационарном потоке в малом элементе газового цилиндра, образованного на радиусе  $r$  приращением  $dr$  (рис. 1.6а), существует равновесие движущей силы  $f_1 = \pi r^2 dp$ , вызываемой разностью давлений, и силы внутреннего трения в газах

$$f_2 = \eta \cdot 2\pi \cdot r \frac{dv}{dr} \cdot dl.$$

Условие равновесия можно записать в виде

$$\pi \cdot r^2 dp + 2\pi \cdot r \eta \frac{dv}{dr} dl = 0. \quad (1.66)$$

Принимая  $dv/dr$ , не зависящим от  $l$  (распределение скоростей по всей длине трубопровода постоянно), после интегрирования в пределах от 0 до  $l$  получим

$$(p_2 - p_1) r + 2l \eta \frac{dv}{dr} = 0. \quad (1.67)$$

Вновь интегрируя по радиусу трубопровода, при начальных условиях  $r = r_0$ ,  $v = 0$  получим параболическое распределение скоростей по сечению трубопровода:

$$v = (p_2 - p_1) (r_0^2 - r^2) / (4\eta l). \quad (1.68)$$

Объёмный расход газа

$$V = \int_0^{r_0} v 2\pi r dr = \frac{\pi r_0^4 (p_2 - p_1)}{8\eta l}. \quad (1.69)$$

Поток газа  $Q$ , протекающий через трубопровод, найдём как произведение объёмного расхода  $V$  на среднее давление в трубопроводе:

$$Q = V \frac{p_2 + p_1}{2} = \frac{\pi r_0^4 (p_2 - p_1) (p_2 + p_1)}{16 \eta l}. \quad (1.70)$$

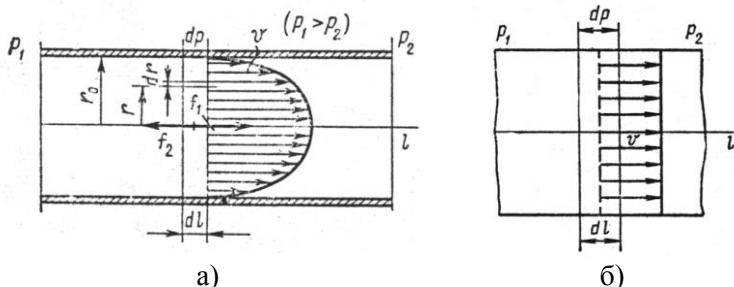


Рис. 1.6. Схема течения газа в трубопроводе:  
а) при вязкостном режиме; б) при молекулярном режиме

Запишем выражение для проводимости при вязкостном режиме течения:

$$U_{\text{TB}} = Q / (p_2 - p_1) = \pi r_0^4 (p_1 + p_2) / (16\eta l). \quad (1.71)$$

Таким образом, проводимость круглого трубопровода при вязкостном режиме течения газа обратно пропорциональна его длине и коэффициенту динамической вязкости газа, прямо пропорциональна среднему давлению в трубопроводе и четвертой степени радиуса трубопровода.

Для воздуха при  $T = 293 \text{ K}$ :

$$\eta = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Н/(м}^2 \cdot \text{с)} \quad (1.72)$$

можно преобразовать к виду

$$U_{\text{тв}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4 (p_1 + p_2)}{2l}. \quad (1.73)$$

Здесь  $d$  и  $l$  — в м;  $p$  — в Па; а  $U_{\text{тв}}$  — в м<sup>3</sup>/с. Это же выражение, если  $d$  и  $l$  — в см;  $p$  — в торр, а  $U_{\text{тв}}$  — в л/с, имеет вид

$$U_{\text{тв}} = 182 \frac{d^4 (p_1 + p_2)}{2l}. \quad (1.74)$$

При высоком вакууме и молекулярном режиме течения газа длина свободного пути молекул газа больше диаметра трубы, молекулы движутся независимо друг от друга, соударяясь лишь со стенками трубопровода. Будем считать, что каждая из молекул, хаотически движущихся в трубопроводе, имеет постоянную составляющую переносной скорости  $v_{\text{п}}$ , направленной по оси трубопровода в область с меньшим давлением.

Движущая сила в этом случае

$$f_1 = d p A, \quad (1.75)$$

где  $A$  — поперечное сечение трубопровода.

Уравновешивающая сила, равная общему изменению количества движения всех молекул при их ударе о стенку трубки:

$$f_2 = -BdlN_qmv_{\pi}, \quad (1.76)$$

где  $B$  — периметр трубопровода;  $N_q = \frac{nv_{\text{ар}}}{4} = \frac{p}{\sqrt{2\pi mkT}}$  — число молекул, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени.

Уравнение равновесия  $f_1 + f_2 = 0$  можно записать, в виде

$$DpA - BdlN_qmv_{\pi} = 0. \quad (1.77)$$

Если в (1.76) ввести объемный расход  $V = v_{\pi}A$  и подставить выражение для  $N_q$ , то получим

$$\frac{dp}{mp_{\text{ср}}V} \sqrt{2\pi mkT} = \frac{B}{A^2} dl. \quad (1.78)$$

В стационарном режиме произведение  $p_{\text{ср}} = Q = \text{const}$ , где  $p_{\text{ср}} = (p_1 + p_2)/2$ . Проинтегрируем это отношение в пределах от  $p_1$  до  $p_2$ :

$$\frac{p_2 - p_1}{mQ} \sqrt{2\pi mkT} = \int_0^l \frac{B}{A^2} dl. \quad (1.79)$$

Откуда поток газа

$$Q = \frac{\sqrt{2\pi mkT} (p_2 - p_1)}{m \int_0^l \frac{B}{A^2} dl}, \quad (1.80)$$

для  $v_{\text{ар}}$ , имеем

$$Q = \frac{\pi v_{\text{ap}} (p_2 - p_1)}{2 \int_0^l \frac{B}{A^2} dl}. \quad (1.81)$$

Более точное выражение для  $Q$  получено Кнудсенom с учетом функции распределения молекул по скоростям:

$$Q = \frac{4 v_{\text{ap}} (p_2 - p_1)}{3 \int_0^l \frac{B}{A^2} dl}. \quad (1.82)$$

Проводимость трубопровода в этом случае

$$U_{\text{TM}} = \frac{Q}{p_2 - p_1} = \frac{4 v_{\text{ap}}}{3 \int_0^l \frac{B}{A^2} dl}. \quad (1.83)$$

Для трубопровода постоянного поперечного сечения имеем

$$U_{\text{TM}} = 4v_{\text{ap}} A^2 / (3Bl). \quad (1.84)$$

В случае круглого поперечного сечения

$$U_{\text{TM}} = \frac{\pi d^3 v_{\text{ap}}}{12 l} = 38,1 \cdot \frac{d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (1.85)$$

где  $d$  и  $l$  выражено в м;  $M$  — в кг/кмоль;  $T$  — в К;  $U$  — в м<sup>3</sup>/с. Таким образом, проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения не зависит от давления.

Для воздуха при 293 К проводимость цилиндрического трубопровода круглого поперечного сечения

$$U_{\text{TM}} = 121 \cdot d^3 / l. \quad (1.86)$$

Если выражать  $d$  и  $l$  в см, а  $U$  — в л/с, то формула для расчёта проводимости (1.50) примет другой вид:

$$U_{\text{TM}} = 12,1 \cdot d^3 / l. \quad (1.87)$$

Повышение давления в закрытом вакуумном сосуде с течением времени указывает на наличие негерметичности (течи).

Действительная негерметичность возникает вследствие неточности соединений, образования трещин, несовершенства в изготовлении или вследствие применения материала, проницаемого для газов.

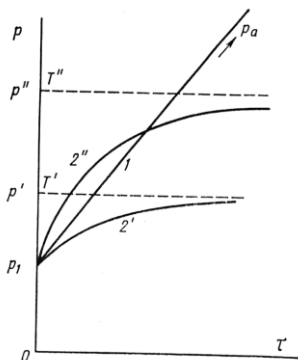


Рис. 1.7. Рост давления  $p$  со временем  $\tau$  при действительной и мнимой негерметичности:

- 1 — действительная негерметичность, давление растёт вплоть до атмосферного;
- 2 — мнимая негерметичность, давление устанавливается на определённом уровне  $p'$  (при  $T'$ ) или  $p''$  (при  $T''$ )

Мнимая негерметичность проявляется как десорбция газов с поверхностей, находящихся в вакуумном пространстве, а именно со стенок, электродов и т.д. : обычно она связана с применением неподходящих материалов и недостаточным обезгаживанием вакуумной системы.

Действительной негерметичности соответствует в целом линейное возрастание давления в системе со временем (рис. 1.7), ибо поток газа из окружающей среды в вакуумную систему (при

низком давлении  $p$  в ней). В самом деле, поток газа через действительную негерметичность

$$l_{д.н} = G_{д.н}(p_a - p) \approx G_{д.н}p_a \quad (1.88)$$

можно считать постоянной величиной. В формуле (1.88) величина  $p_a$  ( $p_a \gg p$ ) обозначает атмосферное давление.

В случае мнимой негерметичности по мере возрастания давления в системе десорбция уменьшается и становится равной нулю в момент установления состояния равновесия при определённых давлении  $p_1$  и температуре  $T_1$ . При более высокой температуре  $T_2$  равновесное давление  $p_2$  будет также выше.

## 1.8. Поверхностные явления в вакууме

На поверхности твёрдого тела обычно существует слой связанных молекул. Поглощение молекул твёрдым телом называется сорбцией, обратный процесс — десорбцией, а поглощающее тело — сорбентом. Эти явления имеют большое значение в вакуумной технике. Интенсивная десорбция приводит к обильному газовыделению и сильно замедляет откачку, наоборот, активная сорбция ведёт к быстрому поглощению газа и используется для откачки в специальных сорбционных насосах.

На поверхности системы может быть связано много большее число молекул по сравнению с числом молекул свободно летающих в объёме.

Адсорбированные молекулы находятся на поверхности в состоянии динамического равновесия, когда часть молекул в результате случайных процессов отрывается и уходит и столько же частиц за это время соударяется с поверхностью и вновь поглощается ею. При этом количество молекул на единице поверхности остаётся постоянным, оно зависит от давления, температуры и от свойства материала.

Явления, приводящие к поглощению молекул, различаются по природе. При физической адсорбции молекулы удерживаются на поверхности силами Ван-дер-Ваальса. Поверхностные силы кристаллической решётки не уравновешены с внешней стороны.

Поэтому на поверхности существуют центры адсорбции с расстояниями порядка молекулярных размеров ( $10^{-8}$  см), а число поглощённых молекул пропорционально площади поверхности. Адсорбированные молекулы могут располагаться мономолекулярным слоем или в несколько слоёв. Адсорбированное состояние устойчиво и соответствует минимуму потенциальной энергии молекулы. Поэтому адсорбция сопровождается выделением энергии, которую можно характеризовать удельной теплотой адсорбции. Наоборот, нагревание сообщает молекулам добавочную энергию для преодоления потенциального барьера и приводит к десорбции.

Хемосорбция сопровождается образованием валентных связей молекул газа с поверхностью; некоторые реакции эндотермические, поэтому нагрев может, увеличит количество хемосорбированных молекул. Абсорбцией называют объёмное поглощение газов твёрдым телом, при этом возможны образование твёрдых растворов, объёмная хемосорбция и другие процессы.

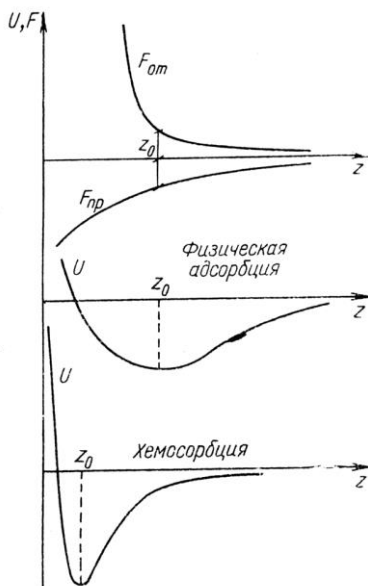


Рис. 1.8. Потенциальные ямы при адсорбции



Упрощённо можно считать, что вблизи поверхности существует сила притяжения  $F_{\text{пр}}$  и отталкивания  $F_{\text{от}}$ , причём последние уменьшаются быстрее с удалением от поверхности. На некотором расстоянии  $z_0$  силы, действующие на молекулу газа, уравновешиваются, при этом имеет место минимум потенциальной энергии  $U\left(-\frac{dU}{dz} = F_{\text{пр}} + F_{\text{от}}\right)$  (рис. 1.8). Это равновесие обладает свойством устойчивости, так как при удалении молекулы ( $z > z_0$ ) притяжение преобладает ( $F_{\text{пр}} > F_{\text{от}}$ ) и молекула приближается к  $z_0$ . Наоборот, если молекула сместится от равновесия ближе к поверхности, то при  $z < z_0$  силы отталкивания ( $F_{\text{от}} > F_{\text{пр}}$ ) вернут её назад к  $z_0$ .

Физическую адсорбцию и хемосорбцию трудно различить, но при последней связь обычно более прочная. Условно считают, что при глубине потенциальной ямы менее 3–4 ккал/моль имеет место физическая адсорбция, при энергии связи свыше 8 ккал/моль — хемосорбция.

Изотермами адсорбции называют кривые, показывающие зависимость равновесного количества адсорбированного газа  $\mu$  на единицу поверхности или массы сорбента от давления при различных температурах. Очевидно,  $\mu$  должно возрастать с увеличением давления у поверхности и убывать с ростом температуры.

При испарении вещества в вакууме над нагретой поверхностью в ограниченном объёме накапливаются молекулы пара, его давление увеличивается и усиливается обратный процесс конденсации. Равновесное давление пара называют упругостью насыщенных паров. Это давление для данного вещества возрастает с температурой: чем больше температура, тем больше скорость испарения, тем больше давление необходимо, чтобы уравновесить его конденсацией. Удельная теплота испарения  $L = (T/l\rho) \cdot dP/dt$  кал/г, где  $l$  — механический эквивалент тепла;  $\rho$  — плотность пара. Экспериментально установлено, что величина  $L$  линейно убывает с температурой:  $L = L_0 - aT$ . Используя  $\rho = Pm/kT$ , получим

$$L_0 - aT = \frac{k}{mJ} \cdot \frac{T^2}{P} \cdot \frac{dP}{dt}. \quad (1.89)$$

После интегрирования имеем

$$\ln P = \ln P_0 - \frac{mJ}{kT} L_0 - \frac{amJ}{k} \ln T. \quad (1.90)$$

Формула Клапейрона (1.55) описывает зависимость упругости насыщенных паров от температуры. Обычно её пишут в виде  $\ln P = A - B/T$ , пренебрегая слабым членом с  $\ln T$ .

Например, для вольфрама  $A = 12,24$ ;  $B = 4,026 \cdot 10^{-2}$ , если давление выражено в торрах.

Упругость насыщенных паров обладают не только жидкостями, но и твёрдые тела, так как испарение может происходить из твёрдой фазы. Упругость — это максимальное давление вещества при данной температуре. Пар в состоянии насыщения не подчиняется закону Бойля-Мариотта, сжатие его приводит к усилению конденсации при сохранении исходного давления, равного упругости паров. Высокое значение упругости может ограничить возможность получения вакуума. Например, наличие воды в системе не позволит понизить давление ниже 17,5 торр до полного испарения воды.

Упругости паров различных химических элементов в зависимости от температуры приведены в приложении.

## ГЛАВА 2

### ПОЛУЧЕНИЕ ВАКУУМА

В основу получения вакуума могут быть положены два принципа: первый — удаление газа из откачиваемого сосуда за пределы вакуумной системы, второй — связывание газа в вакуумной системе. Первый принцип реализован в газоперемещающих насосах.

Перемещение массы газа можно производить периодически, отдельными порциями и непрерывно. Для удаления порции газа необходимо изолировать в рабочей камере насоса определенный объем газа, переместить его от входного патрубка насоса к выходному, сжать в процессе перемещения до давления, большего, чем давление в выходном сечении насоса, и вытолкнуть газ за пределы насоса. Вакуумные насосы, которые откачивают газ отдельными порциями в результате периодического изменения объема и положения рабочей камеры, называются объемными вакуумными насосами. Объемными вакуумными насосами являются только механические насосы, т. е. такие насосы, откачивающее действие которых основано на перемещении газа вследствие механического движения рабочих частей насоса.

Для непрерывного удаления нейтральных молекул газа необходимо иметь тело, которое постоянно увлекало бы и перемещало газ. Таким телом может быть непрерывно движущаяся твердая поверхность или струя жидкости, пара или газа. При соударении с движущейся твердой поверхностью и в результате

внутреннего трения молекулы газа приобретают преимущественное направление движения. Механические насосы, откачивающее действие которых основано на увлечении удаляемого газа непрерывно движущимися твердыми поверхностями, получили название молекулярных, так как движущиеся части насоса воздействуют на отдельные молекулы.

Вакуумные насосы, в которых реализуется второй принцип создания вакуума, получили название сорбционных насосов. Газ в сорбционных насосах может связываться геттером (геттер — вещество, применяемое для хемосорбции газов в вакуумных системах), а также сорбироваться и конденсироваться на охлаждаемой поверхности.

Классификация вакуумных насосов по принципу действия приведена на рис. 2.1.

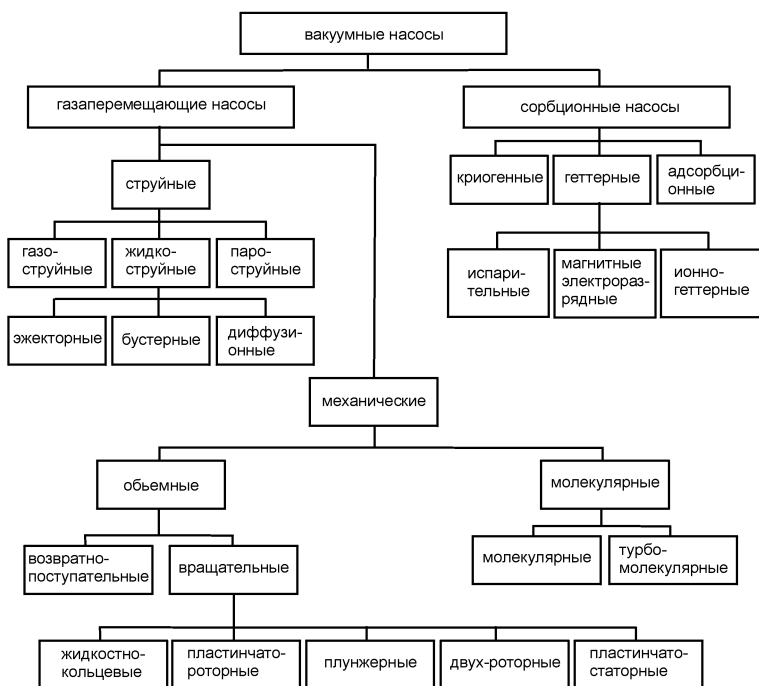


Рис. 2.1. Классификация вакуумных насосов

Основные параметры вакуумных насосов.

*Быстрота действия насоса* — это объем газа удаляемый насосом в единицу времени через входной патрубок насоса:

$$S_H = dV/dt \quad (\text{л/с, м}^3/\text{ч}) \quad (2.1)$$

*Эффективная быстрота откачки ( $S_{\text{эф}}$ ) насоса* — это объем газа, поступающий в единицу времени из откачиваемого объема в трубопровод. Она зависит от сопротивления трубопровода.

*Производительность вакуумного насоса* характеризует расход газа во входном сечении насоса при данном давлении и выражается в  $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ . Легко показать, что производительность насоса есть произведение быстроты откачки на давление, при котором она измерена:

$$Q = p S_H. \quad (2.2)$$

Установим связь между тремя основными характеристиками вакуумной системы: быстротой действия насоса  $S_H$ , эффективной быстротой откачки объекта  $S_{\text{эф}}$  и проводимостью вакуумной системы между насосом и откачиваемым объектом  $U$ :

$$\begin{aligned} S_H &= Q/p_2 = U (p_1 - p_2) / p_2, \\ S_{\text{эф}} &= Q/p_1 = U (p_1 - p_2) / p_1. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Если переписать (2.3) в виде

$$\frac{1}{S_H} = \frac{p_2}{(p_1 - p_2) U}; \quad \frac{1}{S_{\text{эф}}} = \frac{p_1}{(p_1 - p_2) U},$$

то после вычитания первого выражения из второго получим

$$\frac{1}{S_{\text{эф}}} - \frac{1}{S_H} = \frac{1}{U}. \quad (2.4)$$

Уравнение (2.4) называют основным уравнением вакуумной техники, которое может быть переписано в виде:

$$S_{\text{эф}} = S_{\text{н}} U / (S_{\text{н}} + U). \quad (2.5)$$

При условии  $S_{\text{н}} = U$  из (2.5) получим, что  $S_{\text{эф}} = 0,5 S_{\text{н}}$ . Если  $U \rightarrow \infty$ , то  $S_{\text{эф}} \rightarrow S_{\text{н}}$ ; при  $U \rightarrow 0$  следует  $S_{\text{эф}} \rightarrow 0$ .

Наибольшее давление запуска вакуумного насоса — это то наибольшее давление в его входном сечении, при котором насос может начать работу.

Наибольшее рабочее давление вакуумного насоса — это то наибольшее давление в его входном сечении, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия.

Предельное остаточное давление, наибольшее давление запуска, наибольшее рабочее давление и наибольшее выпускное давление выражаются в единицах давления газа Па (паскалях) и других производных единицах.

Наибольшее выпускное давление — это наибольшее давление в выходном сечении насоса, при котором насос еще способен осуществлять откачку, т.е. осуществлять перенос массы газа со стороны с низким давлением на сторону с более высоким давлением газа. Эта величина является одной из основных характеристик молекулярных и других типов насосов, в которых осуществляется перемещение газа, в частности струйных насосов.

В данной главе рассмотрены основные типы насосов, применяющиеся на кафедре вакуумной электроники МФТИ. Отдельные типы насосов не отражены в данном пособии из-за недостатка места, с их особенностями можно ознакомиться в цитируемой литературе.

## 2.1. Вращательные насосы с масляным уплотнением

Вращательный вакуумный насос с масляным уплотнением является неизменным элементом большинства вакуумных систем. С его помощью создается предварительное разрежение в вакуумной системе и форвакуумное давление на выходе высоковакуумных газоперемещающих насосов. Вращательные вакуумные насосы с масляным уплотнением относятся к вакуумным насосам объемного действия. Наибольшее распространение получили три типа вращательных насосов с масляным уплотнением.

ем: пластинчато-статорные, пластинчато-роторные и плунжерные насосы.

Пластинчато-статорные насосы — обычно насосы малой производительности, пластинчато-роторные — средней производительности, плунжерные — средней и большой производительности.

На рис. 2.2 схематично изображен пластинчато-статорный вращательный вакуумный насос. В неподвижном корпусе 1 на валу 2 эксцентрично расположен ротор 3. Полезный объем рабочей камеры насоса, образованный внутренней поверхностью корпуса-статора 7 и наружной поверхностью ротора 3, пластиной 4 разделяется на полость всасывания I и полость сжатия II. Пластина 4, расположенная в прорези корпуса насоса, с помощью пружины 5 через рычаг 6 плотно прижимается к ротору 3. При вращении ротора 3 в направлении, указанном стрелкой, газ из откачиваемого сосуда, который не показан на рисунке, через впускной клапан 7 заполняет увеличивающуюся в объеме полость I. В это время газ в полости II сжимается. Когда давление газа на клапан 8 превысит величину атмосферного давления и усилия создаваемого пружинной 9, клапан 8 откроется, и газ из полости II будет вытеснен в атмосферу. При дальнейшем вращении ротор 3, пройдя пластину 4 и выход впускного канала 7, отделяет в рабочей камере насоса следующую порцию газа от откачиваемого объема. Таким образом, за два оборота ротора порция газа отделяется от откачиваемого объема, перемещается от впускного канала 7 к выхлопному клапану 8, сжимается в полости II и вытесняется под клапаном 8 в атмосферу. При каждом следующем обороте следующая порция газа отделяется от откачиваемого объема, а предыдущая вытесняется из насоса в атмосферу. В пластинчато-статорном насосе за один оборот ротора происходит один цикл откачки, т. е. отделяется от откачиваемого объема и вытесняется только одна порция газа.

На рис. 2.3 схематично изображен пластинчато-роторный насос. В цилиндрической рабочей камере корпуса 1 симметрично на валу (не показан на рисунке) расположен ротор 2, ось которого  $O'$  смещена относительно оси рабочей камеры  $O''$ . В сквозной прорези ротора размещены пластины  $3'$  и  $3''$ .

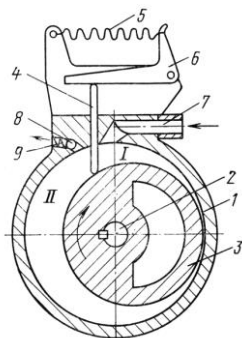


Рис. 2.2. Пластино-статорный вращательный вакуумный насос

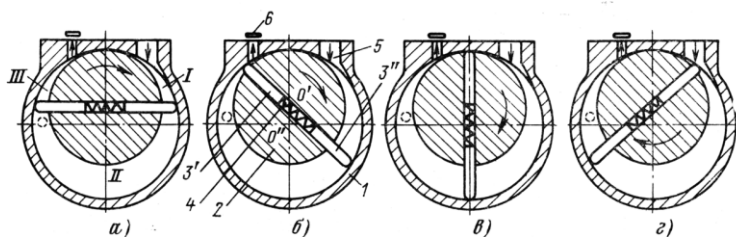


Рис. 2.3. Пластино-роторный вакуумный насос

Пружиной 4 они прижимаются к корпусу насоса. В положении ротора, изображенном на рис. 2.3а, пластинами 3' и 3'' и плоскостью касания ротора со статором полезный объем рабочей камеры разделен на три полости: I — полость всасывания, II — полость перемещения и частичного сжатия газа, III — полость вытеснения газа. При вращении ротора в направлении, указанном стрелкой, полость I увеличивается и дополнительное количество газа из откачиваемого сосуда по впускному каналу 5 поступает в рабочую камеру насоса. Полость II уменьшается в объеме, в ней происходит сжатие газа. Полость III уменьшается, и газ из нее через выпускной канал под клапаном 6 вытесняется из насоса. При положении ротора, изображенном на рис. 2.3б, заканчивается вытеснение газа из полости III. При дальнейшем вращении ротора полость II переходит в полость III, т.е. наступает момент, когда становится возможным вытеснение следующей порции газа



(рис. 2.3в). В положении ротора, изображенном на рис. 2.3г, полости I и II сообщаются между собой. Лишь когда ротор повернется на  $180^\circ$  от начального положения и займет положение, тождественное исходному (рис. 2.3а), происходит разделение полостей I и II, и от откачиваемого объема отделяется очередная порция газа. В этот момент полость II имеет наибольший объем. В пластинчато-роторном насосе за один оборот ротора происходят два цикла откачки, т.е. отделяются от откачиваемого объема и вытесняются из насоса две порции газа.

На рис. 2.4 схематически изображен плунжерный насос. В корпусе насоса выполнена цилиндрическая рабочая камера, в которой вращается эксцентричный ротор 2 с надетым на него плунжером 1.

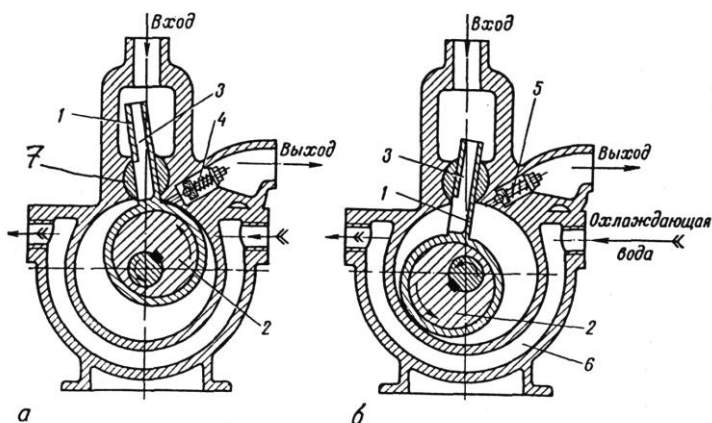


Рис. 2.4. Плунжерный вакуумный насос:

а — завершение периода удаления и начало периода наполнения

б — промежуточное положение

1 — плунжер; 2 — ротор; 3 — канал в золотнике; 4 — выходной обратный клапан открыт; 5 — выходной обратный клапан закрыт; 6 — вода, охлаждающая статор насоса; 7 — шарнир

Плунжер состоит из цилиндрической части, охватывающей эксцентрик 2, и полой прямоугольной части 1, свободно перемещающейся в пазу шарнира 7. При повороте плоской части плунжера шарнир 7 свободно поворачивается в гнезде корпуса насоса.

В этом насосе плунжер имеет канал 3, через который газ из откачиваемой полости поступает в насосную камеру.

Возможность попадания встречного потока газа на вход в насос здесь в значительной степени ограничена благодаря более раннему закрытию входа при движении золотника; вредное пространство может быть также уменьшено. Герметичность контакта ротора с цилиндром в насосах рассматриваемого типа лучше потому, что в клине между ротором и цилиндром образуется более толстый слой масла; кроме того, эти насосы создают меньше шума.

Механические насосы производят откачку объема, начиная с атмосферного давления. Откачиваемый газ они вытесняют в атмосферу. Поэтому по отношению к механическим насосам не принято использовать такие характеристики, как наибольшее рабочее давление, наибольшее давление запуска и наибольшее выпускное давление. Основными вакуумными характеристиками механических вакуумных насосов с масляным уплотнением являются предельное остаточное давление и быстрота действия.

Быстрота действия механических насосов с масляным уплотнением практически не зависит от рода откачиваемого газа.

Остаточное давление насосов с масляным уплотнением определяется конструкцией насоса и свойствами рабочей жидкости. В качестве рабочей жидкости насосов с масляным уплотнением, как правило, используются масла, получаемые из промышленных минеральных масел. Кроме обычных требований (низкая кислотность, необходимая вязкость, хорошие смазывающие свойства и т. п.), к маслам для вакуумных насосов предъявляются дополнительные требования: низкое давление насыщенных паров в интервале рабочих температур насоса, малое поглощение газов и паров, стабильность вязкости при изменении температуры, высокая прочность тонкой (0,05–0,10 мм) масляной пленки, способной выдержать в зазоре перепад давлений, равный атмосферному давлению.

Остаточный газ (газ, оставшийся в вакуумной системе после откачки) механического вакуумного насоса с масляным уплотнением составляют воздух, газы откачиваемой среды, а также пары и продукты разложения рабочей жидкости насоса. В механическом вакуумном насосе, как и в любом газоперемеща-

ющем насосе, наряду с основным потоком в направлении откачки существует обратный поток газа с выхода насоса в откачиваемый сосуд. Газы попадают во входное сечение насоса из циркулирующего в нем масла и в результате перетечки по зазорам в откачном механизме. Разложение масла в основном происходит в результате возникновения высоких местных температур в областях непосредственных контактов трущихся металлических поверхностей. Образующиеся при этом растворимые в масле, легколетучие углеводороды в значительной степени обуславливают предельное остаточное давление насоса, так как они имеют существенно более высокие давления насыщенного пара, чем сама рабочая жидкость.

Стабильность характеристик насосов с масляным уплотнением определяется величиной зазоров между поверхностями, перемещающимися относительно друг друга, их количеством, а также качеством масла, поступающего в рабочую камеру для уплотнения зазоров и смазки трущихся поверхностей. Максимальная быстрота действия и минимальное остаточное давление достигаются при таком притоке масла в рабочую камеру, которое обеспечивает и надежное уплотнение зазоров, и выброс в масляный резервуар в момент выхлопа верхнего слоя масла с растворенным в нем откачиваемым газом.

### Эксплуатация и обслуживание

Работа большинства насосов с масляным уплотнением сопровождается заметной вибрацией. Поэтому коммуникации, соединяющие насосы с вакуумной системой, должны включать сильфонную развязку или участок гибкого эластичного трубопровода, например, вакуумный резиновый шланг. Небольшие насосы с быстротой действия до 5–7 л/с часто устанавливают прямо на полу, подложив под них резиновый лист для уменьшения шума и предотвращения смещения их в процессе работы.

Пуск механических вакуумных насосов с масляным уплотнением сопровождается забрызгиванием масла во впускной и выпускной патрубки. Кроме того, работа насоса в области впускных давлений от остаточного давления до 10 Па сопровождается довольно интенсивным обратным потоком углеводородов из впускного патрубка насоса в откачиваемый сосуд. Обратный поток уг-

леводородов различен для разных насосов и зависит от состояния насоса, используемого масла и режима работы насоса и находится в пределах от  $1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-7}$  г/(см<sup>2</sup>·мин) до  $5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$  г/(см<sup>2</sup>·мин). Максимальная интенсивность обратного потока наблюдается при работе насоса при остаточном давлении. Для насосов единой серии ВН обратный поток углеводородов составляет величину  $5 \cdot 10^{-7} - 1,3 \cdot 10^{-6}$  г/(см<sup>2</sup>·мин).

Другим недостатком насосов с масляным уплотнением является образование так называемого масляного тумана, который выходит из выхлопного патрубка насоса в виде сизо-белого дыма при работе насоса в области впускных давлений  $1 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^4$  Па (0,7–200 мм рт. ст.). Таким образом, механический вакуумный насос с масляным уплотнением в ряде случаев оказывается основным источником загрязнения откачиваемого сосуда и производственного помещения парами углеводородов.

Поэтому для защиты производственного помещения от загрязнения его масляным туманом выход насоса с помощью дюритового шланга или металлической трубы подключают к выхлопной магистрали.

Для защиты откачиваемого объема от брызг масла следует использовать входной трубопровод специальной конфигурации (рис. 2.5) или брызгоотражатели.

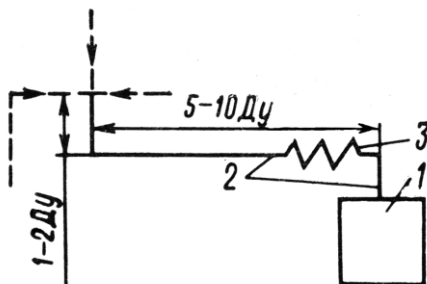


Рис. 2.5. Входной трубопровод к механическому насосу с масляным уплотнением

1 — механический вакуумный насос с масляным уплотнением;  
2 — соединительный трубопровод; 3 — сильфонный компенсатор.

Здесь диаметр условного прохода ( $D_u$ ) соединительного трубопровода равен диаметру входного сечения насоса, а длина обязательных вертикального и горизонтального участков, выраженная в единицах диаметра трубопровода, указана на чертеже. Такой трубопровод исключает попадание брызг масла в откачиваемый объем и создает условия для конденсации и возврата в насос значительной части паров масла.

Ряд насосов с масляным уплотнением обладает еще одним существенным недостатком. При остановке насоса масло, находящееся в масляном резервуаре насоса под атмосферным давлением заполняет рабочую камеру насоса, в которой сохраняется разрежение, и поднимается во впускной патрубок и иногда даже в откачиваемый сосуд, если он соединен с насосом коротким трубопроводом. После этого последующий запуск насоса будет затруднен. Напуск атмосферного воздуха во впускной патрубок сразу после остановки исключает подъем масла и облегчает последующий его запуск. Чтобы при этом в откачиваемом сосуде сохранить разрежение, в трубопровод, соединяющий насос с откачиваемым объемом, устанавливают клапан и ниже него на трубопроводе — второй (напускной) клапан. Схема присоединения насоса к откачиваемому сосуду показана на рис. 2.6.

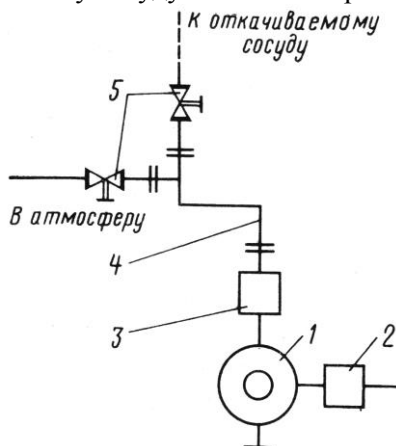


Рис. 2.6. Схема присоединения механического вакуумного насоса с масляным уплотнением:

1 — насос; 2 — маслоотделительное устройство; 3 — поплавковый клапан насоса; 4 — соединительный трубопровод; 5 — клапаны

Чаще всего над механическим насосом для аварийного перекрытия низковакуумной коммуникации и напуска воздуха в насос устанавливаются выпускаемые серийно магнитные клапаны, которые срабатывают автоматически при включении и выключении насоса. Другой способ защиты от подъема масла в откачиваемый объем — постановка во впускном патрубке насоса поплавкового клапана, который запирается поднимающимся маслом.

Значительная доля потребляемой насосом энергии расходуется на постоянное перемещение масляных пленок, служащих для герметизации зазоров. Во время пуска насоса при комнатной температуре вязкость масла и соответственно нагрузка на двигатель максимальны. Поэтому в первый момент не следует нагружать насос большим газовым потоком.

После включения рабочие поверхности быстро нагреваются и вязкость масла и его тормозящее действие уменьшаются. Тем не менее запуск насоса легче производится при атмосферном давлении во впускном патрубке насоса, даже если рабочая камера не заполнена маслом. В соответствии с этим включение насоса производится в следующей последовательности. При закрытых клапанах (рис. 2.6) и атмосферном давлении в трубопроводе включают насос. Запуск насоса лучше производить толчками в два-три приема, включив и тут же выключив электродвигатель. Через 1–2 минуты после включения насоса начинают откачку откачиваемого сосуда. Чтобы избежать чрезмерного выброса масла из выхлопного патрубка насоса, клапан, соединяющий насос с откачиваемым сосудом, открывают постепенно. Малая пропускная способность слегка приоткрытого клапана ограничивает поток газа на входе в насос и этим предотвращает выброс масла.

При эксплуатации насосов особое внимание должно быть обращено на сохранение качества и количества залитого в насос масла. Такие растворители, как бензин, ацетон, трихлорэтилен и др., не полностью удаленные с поверхностей деталей насоса после их промывки, загрязняют масло, ухудшают его свойства и повышают предельное остаточное давление.

Эффективным способом предотвращения конденсации паров в насосе является напуск так называемого балластного газа в полость сжатия рабочей камеры насоса. Устройство, служащее

для напуска балластного газа в насос, например атмосферного воздуха, называют газобалластным устройством, а насос, снабженный таким устройством, — газобалластным насосом. Сейчас насосы выпускаются с газобалластным устройством.

Впуск балластного газа должен быть произведен тогда, когда порция газа уже отделена от откачиваемого сосуда, но степень сжатия откачиваемого газа еще мала. Этому условию отвечает расположение выхода канала для впуска балластного газа на торцевой поверхности рабочей камеры. К моменту открытия выхлопного клапана обратный клапан газобалластного устройства закрывается и несконденсированный пар вместе с балластным газом выталкивается из рабочей камеры насоса через выхлопной клапан.

Если в процессе работы механический вакуумный насос с масляным уплотнением не обеспечивает необходимого остаточного давления, это может объясняться

- 1) недостатком масла в насосе;
- 2) плохим качеством или загрязнением масла конденсирующимися парами;
- 3) осмолением рабочих поверхностей;
- 4) загрязнением, коррозией или поломкой выхлопных клапанов;
- 5) поломкой пружин, прижимающих лопатки в пластинчато-статорных и пластинчато-роторных насосах;
- 6) загрязнением каналов для подачи масла в рабочую камеру насоса;
- 7) износом или поломкой деталей насоса.

Средний ресурс механических вакуумных насосов с масляным уплотнением до капитального ремонта не менее 12–15 тыс. часов, причем ресурс крупных насосов несколько ниже средней величины, а ресурс малых насосов может существенно превышать это время. В течение всего срока службы у насосов возникает в среднем около 10 отказов.

## **2.2. Двухроторные насосы**

Схема устройства двухроторного насоса показана на рис. 2.7. В овальной рабочей камере корпуса 1 синхронно враща-

ются два ротора 2, в сечении напоминающие цифру 8. Последовательное положение роторов при вращении схематично изображено на рис. 2.8. Синхронность вращения обеспечивается закрепленными на валу роторов шестернями связи 3, вынесенными за пределы рабочей камеры. Смазка шестерен и опорных подшипников осуществляется разбрызгиванием масла из масляной ванны. Полость масляной ванны, образованной корпусом и крышками 4 и 5, герметична. Вывод ведущего вала уплотняется манжетой. Для надежной герметизации вала и увеличения ресурса манжеты из масленки 6 на манжету постоянно подается масло. В двухроторном насосе используется масло для насосов с масляным уплотнением.

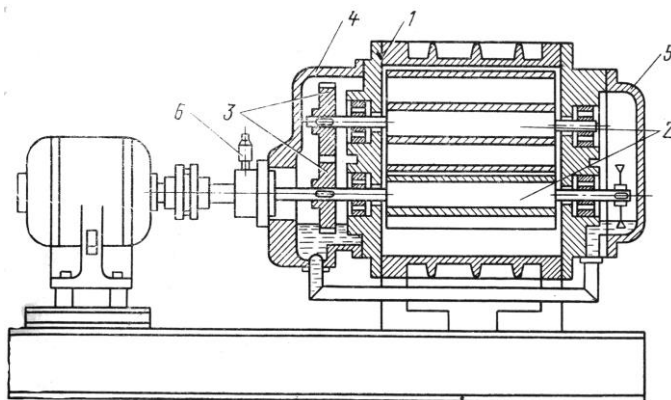


Рис. 2.7. Схема двухроторного насоса

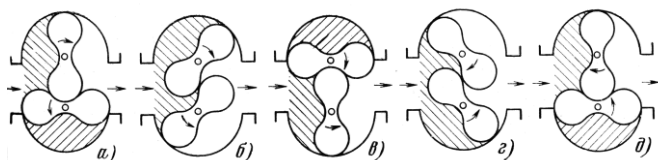


Рис. 2.8. Последовательные положения роторов при работе  
Стрелками показано направление потока откачиваемого газа и вращения роторов

Особенность двухроторных насосов — наличие довольно больших зазоров в роторном механизме. Если в рассмотренных ранее насосах перетечки газа с выхода на вход сказываются толь-



ко при работе в области впускных давлений, близких к остаточному, а в остальное время ими можно пренебречь, то в двухроторном насосе их надо учитывать постоянно, так как они соизмеримы с откачиваемым потоком. Объемная скорость перемещения газа роторами постоянна и определяется геометрическими размерами рабочей камеры и скоростью вращения роторов. Количество же газа, протекающего по зазору, зависит от рода газа и разности давлений на входе и выходе насоса. Отсюда становится очевидной зависимость быстроты действия и предельного остаточного давления от рода откачиваемого газа и впускного и выпускного давлений. В вакуумной системе двухроторные насосы всегда работают последовательно с форвакуумными насосами (обычно низковакуумным механическим насосом с масляным уплотнением). Двухроторный насос как бы улучшает характеристики форвакуумного насоса: снижает предельное остаточное давление, повышает быстроту действия в области относительно низких впускных давлений, снижает обратный поток углеводородов.

### Эксплуатация и обслуживание

Многое из того, что относится к подготовке к эксплуатации насосов с масляным уплотнением, относится и к двухроторным насосам. В частности, аналогична установка насоса. Между двухроторным насосом и форвакуумным насосом обязательна постановка сильфонного компенсатора.

Повышение в процессе эксплуатации остаточного давления двухроторного насоса чаще всего объясняется появлением течи во фланцевом соединении. В этом легко убедиться по тому факту, что и выпускное давление оказывается несколько выше обычной величины. Другой причиной повышения остаточного давления может быть неисправность форвакуумного насоса. При отыскании причин повышения остаточного давления над двухроторным насосом вначале необходимо убедиться в исправности форвакуумного насоса, а затем исследовать двухроторный насос. Неглубокие риски и царапины на роторах практически не влияют на характеристики двухроторного насоса.

## 2.3. Турбомолекулярные насосы

Турбомолекулярные насосы сочетают принцип молекулярного увлечения и осевого компрессора. При этом точки на окружности ротора имеют линейные скорости порядка молекулярных (430 м/с). Поэтому вал таких насосов должен вращаться со скоростью 10 000–60 000 об/мин в зависимости от диаметра насоса.

По сравнению со многими другими сверхвысоковакуумными насосами турбомолекулярным насосам присущ ряд преимуществ: постоянная готовность к работе, быстрый (10–15 мин) запуск, нечувствительность к резкому повышению давления (вплоть до атмосферного), широкий диапазон рабочих давлений ( $10^{-7}$  –  $10^{-1}$  Па) примерно одинаковая быстрота действия по большинству газов, чрезвычайно высокая степень сжатия ( $10^{15}$ ) для газов с большой молекулярной массой ( $M \geq 44$ ). Высокая степень сжатия обеспечивает давление углеводородов на входе турбомолекулярного насоса не более  $10^{-15}$  Па ( $10^{-3}$  торр), т.е. практически безмаслянный вакуум, при давлении на форвакууме 1–13 Па ( $7 \cdot 10^{-3}$  – 0,1 торр), соответствующем остаточному давлению большинства насосов с масляным уплотнением. Большое влияние на характеристики насоса оказывает конструкция опорных узлов: на смазываемых подшипниках качения, на магнитных опорах или газовой подушке.

Схемы насосов с горизонтальным и вертикальным расположением вала ротора показаны на рис. 2.9. В корпусе 2 установлены неподвижные статорные колеса 4, между которыми вращаются колеса 3, закрепленные на роторе 1. Роторные колеса выполняются в виде дисков с прорезями. В статорных колесах имеются зеркально расположенные прорези такой же формы.

При горизонтальном положении ротора движение газа в насосе после входа во всасывающий патрубок разветвляется на два потока, которые соединяются в выхлопном патрубке.

В связи с малыми коэффициентами компрессии каждой ступени в турбомолекулярном насосе можно увеличить рабочие зазоры. При диаметре рабочих колес 200 мм осевой (между колесами) и радиальный (между корпусом и роторным колесом или ротором и статорным колесом) зазоры могут составлять 1–1,2 мм,

что позволяет значительно повысить надежность их работы. Увеличение зазоров, снижая коэффициент компрессии насоса, слабо влияет на его быстроту действия. При молекулярном режиме течения молекулы откачиваемого газа, прошедшие через паз статорного диска сверху или отразившиеся от него и попавшие в паз роторного диска, имеют большую вероятность пройти через него, так как боковая стенка 5 паза роторного диска уходит с пути молекул, а стенка 6 в подавляющем большинстве случаев не нагоняет их. В тех редких случаях, когда стенка 6 нагоняет часть молекул, большинство из них после соударения приобретает результирующее направление дальнейшего движения в направлении откачки (на рисунке сверху вниз). Напротив, молекулы, вошедшие в паз роторного диска снизу, против направления откачки, с большой вероятностью отражаются им обратно.

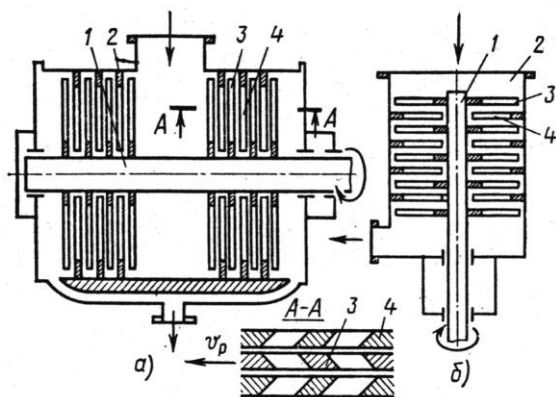


Рис. 2.9. Схемы турбомолекулярных насосов:  
а) — с горизонтальным валом; б) — с вертикальным валом

Отношение вероятностей пролета молекул любого газа в прямом и обратном направлениях характеризуется степенью сжатия данного газа насосом. Легкие газы, тепловая скорость молекул которых больше, легче проникают через насос. Для них быстрота действия больше, а степень сжатия меньше. Степень сжатия существующих насосов составляет  $10^2 - 10^3$  по водороду,  $10^7 - 10^{12}$  по азоту, больше или равна  $10^{15}$  по углеводородам и возрастает с увеличением частоты вращения ротора. Увеличение

угла наклона паза ведет к снижению степени сжатия и увеличению быстроты действия.

Турбомолекулярный насос может начинать откачку с давления  $10^2$  Па ( $\sim 1$  торр), но при этом быстрота действия его будет мала, а потребляемая мощность велика в результате тормозящего действия газа; к тому же в насосе будет выделяться заметное количество тепла. Рабочий диапазон впускных давлений турбомолекулярного насоса —  $10^{-7} - 1$  Па ( $10^{-9} - 10^{-2}$  торр). При этом быстрота откачки постоянна. При давлении ниже  $10^{-6}$  Па ( $10^{-8}$  торр) заметнее становится перетекание водорода и других легких газов со стороны форвакуума в откачиваемый сосуд, их парциальное давление приобретает большую относительную величину, что вызывает уменьшение быстроты действия турбомолекулярных насосов.

### Эксплуатация и обслуживание

Турбомолекулярный насос устанавливают на массивное основание. Между турбомолекулярным и форвакуумным насосами обязательна постановка сильфонного компенсатора. Между турбомолекулярным насосом и откачиваемым сосудом сильфонный компенсатор не нужен, так как насос не вибрирует. Быстрота действия форвакуумного насоса — механического вакуумного насоса с масляным уплотнением — в 20–50 раз меньше быстроты действия турбомолекулярного насоса, что обеспечивает соответствие их производительности при наибольших впускных давлениях турбомолекулярного насоса. На основе небольших турбомолекулярных насосов с быстротой действия до 500 л/с выпускаются агрегаты, вакуумная схема которых показана на рис. 2.10.

Как видно из рисунка, в агрегате отсутствуют затвор, обычно помещаемый между высоковакуумным насосом и откачиваемым сосудом, и байпасная линия. Очевидно, поэтому молекулярный насос часто присоединяют непосредственно к откачиваемому сосуду без затвора, что к тому же позволяет достичь максимальной быстроты откачки рабочей камеры установки.

Если в момент остановки турбомолекулярного насоса в него не напускают атмосферный воздух, клапан 3 необходимо закрыть сразу после обесточивания электродвигателя. Постепенное повышение давления в насосе будет способствовать торможению

ротора. Откачка выключенного турбомолекулярного насоса форвакуумным насосом ведет к загрязнению турбомолекулярного насоса и откачиваемого сосуда парами масла. Поэтому следует избегать длительной откачки форвакуумным насосом в период пуска и остановки турбомолекулярного насоса.

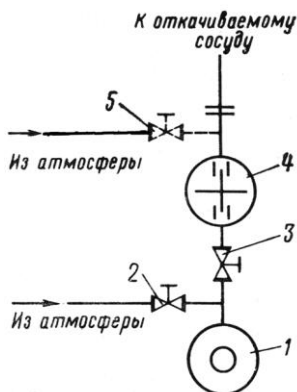


Рис. 2.10. Схема агрегата с турбомолекулярным насосом:

1 — форвакуумный насос; 2,5 — напускные клапаны;  
3 — клапан; 4 — турбомолекулярный насос

Недопустима длительная работа насоса при высоких ( $>10$  Па) впускных давлениях, так как это приводит к выходу из строя электродвигателей.

Большую опасность представляет попадание внутрь насоса относительно крупных твердых частиц. Для предотвращения этого во впускном патрубке насоса должна быть установлена сетка с размерами ячейки  $1 \times 1$  мм, которая, однако, снижает быстроту действия насоса примерно на 25%.

## 2.4. Пароструйные насосы

Откачивающее действие пароструйного насоса основано на увлечении удаляемого газа струей пара. В зависимости от скорости и плотности струи и давления газа изменяется как режим истечения струи из сопла, так и механизм захвата удаляемого газа.

Размеры поверхности паровой диафрагмы сопла III ступени

определяют скорость откачки насоса; характеристики сопла I ступени определяют давление форвакуума. Указаны также примерные величины скорости откачки  $S$  и давления  $p$  в различных ступенях. Многоступенчатый диффузионный насос является своего рода реализацией последовательного соединения нескольких диффузионных насосов в общем корпусе. В таком насосе обычно применяются общий испаритель и общий паропровод для питания сопел отдельных ступеней (рис. 2.11). Скорость откачки насосов определяется скоростью откачки первой ступени со стороны входа в насос.

Зонтичная струя пара захватывает и увлекает молекулы газа, затем пар конденсируется на охлаждаемой стенке насоса, масло, стекая в кипятильник, выделяет газ в область под струей. Затем рабочая жидкость в кипятильнике вновь испаряется, поднимается по паропроводу, через сопло опять образует струю пара и т. д., совершая непрерывный кругооборот.

Струя пара разделяет области низкого входного давления  $P_{\text{вх}}$  и более высокого выходного давления  $P_{\text{вых}}$ , однако большого перепада давлений струя выдержать не может, поэтому выходной патрубок одной ступени пароструйного насоса должен откачиваться струей пара другой ступени, а после ступени I – механическим насосом.

Поскольку все ступени прокачивают один поток газа, их параметры должны удовлетворять условию

$$Sp(\text{вход}) = S_3p_3 = S_2p_2 = S_1p_1(\text{выход}), \quad (2.6)$$

где  $S_i$ , — скорость откачки, а  $p_i$  — давление для  $i$ -й ступени насоса. Например, для пароструйного насоса с быстротой откачки  $S = 100$  л/с при перепаде давлений на нем  $10^{-2} - 10^{-6}$  торр следует использовать масляно-ротационный насос с  $S_{\text{м.н.}} = 0,1$  л/с.

Механизм увлечения газа различен в насосах эжекторных ( $760 - 10^{-1}$  торр), бустерных ( $10^{-1} - 10^{-4}$  торр) и диффузионных ( $10^{-4} - 10^{-7}$  торр). Чем выше давление газа на входе насоса, тем больше должна быть плотность пара в струе. При больших скоростях истечения пара увлечение газа происходит в результате турбулентно-вязкостного перемешивания вихрей пара с частицами газа (эжекторные насосы). С понижением давления и умень-

шением 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). При случайном соударении молекул газа со струёй молекулы могут, как отразиться, так и диффундировать в струю из-за разницы входного давления и парциального давления газа в струе. Элементы струи пара насыщаются газом постепенно по мере движения от сопла к стенке.

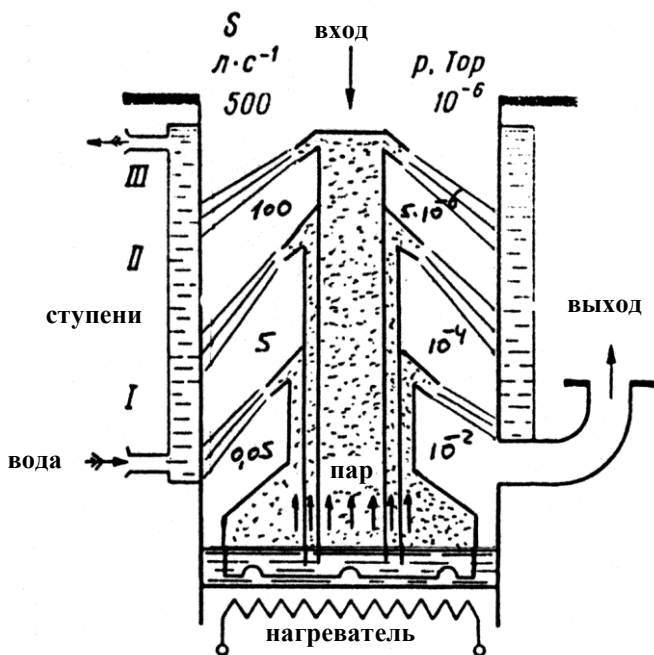


Рис. 2.11. Схема трехступенчатого диффузионного насоса:  
I — эжекторная ступень; II, III — диффузионные ступени

Давление газа ( $P_{\text{вых}}$ ) под струёй больше давления  $P_{\text{вх}}$  над

струей, тем более  $P_{\text{вых}}$  больше давления газа в струе. Поэтому одновременно с диффузией газа сверху в струю происходит вредная диффузия газа снизу в струю. Газ, диффундировавший в струю снизу из области более высокого выходного давления, не выносятся вверх, а увлекается струей вниз и при конденсации пара выделяется обратно в область  $P_{\text{вых}}$ . Поэтому важен малый угол наклона струи к стенке.

Быстрота откачки диффузионного насоса стремится к верхнему пределу

$$S = \frac{Av}{4} \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \frac{v}{v_{\text{стр}}}} = \frac{Av}{4} Z, \quad (2.7)$$

где  $A$  — площадь струи;  $v$  — скорость газа;  $v_{\text{стр}}$  — скорость струи.

Этот предел тем больше, чем больше скорость струи пара, однако уже при  $v_{\text{стр}} = 2v$  быстрота откачки достигает 89% максимума, так что не требуются очень большие скорости струи. При  $v_{\text{стр}} \gg 2v$  достигается максимальная быстрота откачки идеального диффузионного насоса, равная  $S = Av_0/4$ . Легко видеть, что этот же результат получают в предположении, что насос откачивает все молекулы, соударяющиеся без отражений с поверхностью его струи. На струю падает в единицу времени  $Av$  молекул, где  $v = nv_0/4$ , в единице объема заключено  $n$  молекул; следовательно, падающим молекулам соответствует объем  $Av/n$ , т.е.  $Av_0/4$ .

В действительности быстрота откачки насоса меньше максимальной. Обычно  $Z$  (см. уравнение 2.7) оказывается порядка 0,3–0,4. Эта величина определяется отражением молекул газа от струи, ограниченной пропускной способностью входного патрубка насоса, обратной диффузией и т. д.

Основной характеристикой пароструйных насосов является зависимость быстроты действия от давления на входе в насос (рис. 2.12а). В средней области рабочих давлений быстрота действия постоянна и равна  $S_{\text{max}}$ . При приближении рабочего давления к предельному  $p_{\text{пр}}$  она стремится к нулю из-за наличия об-



ратного потока газов и паров из насоса в откачиваемый объект. При увеличении рабочего давления за верхнюю границу молекулярного режима течения быстрота действия уменьшается в связи со снижением скорости диффузии молекул газа в струю пара и при максимальном входном давлении  $p_3$  стремится к нулю.

Предельное давление насоса  $p_{np}$  при низких давлениях на выходном патрубке  $p_{вых}$  (рис. 2.12б) слабо зависит от изменения последнего. Срыв характеристики насоса наступает при равенстве выпускного давления и давления паровой струи, соответствующего давлению  $p_v$ .

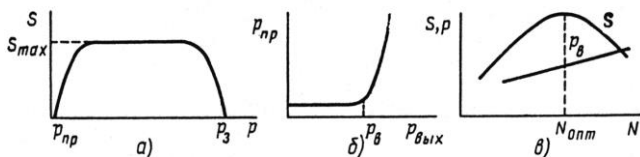


Рис. 2.12. Характеристики пароструйных насосов

При увеличении мощности  $N$  подогрева насоса за счет увеличения скорости паровой струи быстрота действия вначале возрастает (рис. 2.12в), достигает максимального значения при  $N_{opt}$ , а затем уменьшается из-за увеличения плотности паровой струи. Максимальное выпускное давление насоса  $p_v$  при увеличении мощности подогрева непрерывно возрастает.

К рабочим жидкостям пароструйных насосов предъявляются следующие требования:

- 1) минимальная упругость паров при комнатной температуре и максимальная — при рабочей температуре в кипятильнике;
- 2) стойкость к разложению при нагревании;
- 3) минимальная способность растворять газы;
- 4) химическая стойкость по отношению к откачиваемым газам и по отношению к материалам насоса;
- 5) малая теплота парообразования.

Минимальная упругость паров при комнатной температуре требуется для получения наименьшего предельного давления насоса. Максимальное давление паров при рабочей температуре кипятильника увеличивает выпускное давление насоса и умень-

шает требуемую мощность подогревателя. Стойкость к разложению рабочей жидкости при нагревании влияет на срок службы рабочей жидкости и максимальное выпускное давление. Растворимость газов в рабочей жидкости приводит к увеличению обратного потока газов через сопло вместе с паровой струей. Химическая стойкость определяет срок службы рабочей жидкости и накладывает ограничения на выбор конструкционных материалов насосов. При малой теплоте парообразования требуется меньшая мощность подогревателя насоса.

В качестве рабочей жидкости пароструйных насосов применяются ртуть, минеральные масла, сложные эфиры органических спиртов и кислот, кремнеорганические соединения. Ртуть (Р-1, Р-2) как рабочая жидкость пароструйных насосов имеет следующие достоинства: не окисляется воздухом, однородна по составу и не разлагается при рабочих температурах насоса, растворяет малое количество газов и имеет высокую упругость пара при рабочей температуре в кипятильнике. Недостатки ртути: токсичность, химическая активность по отношению к цветным металлам, высокая упругость паров при комнатной температуре ( $10^{-1}$  Па).

Минеральные масла для пароструйных насосов (ВМ-1, ВМ-5) получают путем вакуумной дистилляции продуктов переработки нефти. Они характеризуются низкой упругостью пара при комнатной температуре ( $10^{-6}$  Па), удовлетворительной термостойкостью, но имеют невысокую термоокислительную стойкость и образуют смолистые налеты на внутренних деталях насоса.

Эфиры, применяемые в качестве рабочей жидкости пароструйных насосов, представляют собой продукты синтеза фталевой и себаценовой кислот с высшими спиртами, а также полифениловые соединения, состоящие из бензольных радикалов, соединенных в цепи через атомы кислорода. Полифениловые эфиры ПФЭ обладают очень низким давлением паров при комнатной температуре ( $10^{-9}$  Па) и высокой термоокислительной стойкостью.

Кремнеорганические жидкости для пароструйных насосов (ВКЖ-94, ПФМС-2) — это полисилоксановые полимерные соединения, состоящие из функциональных групп  $(\text{CH}_3)_2\text{SiO}$ . Они

обладают высокой термоокислительной стойкостью и достаточно низкой упругостью пара при комнатных температурах ( $10^{-5}$  Па).

Чаще всего используют в насосах дешевые минеральные масла. Кремнеорганические жидкости употребляются в системах с частым напуском атмосферного воздуха. Эфиры, стоимость которых еще велика, применяются для систем, где требуется получение сверхвысокого вакуума. Ртуть из-за токсичности применяется в пароструйных насосах только для откачки ртутных систем, например ртутных выпрямителей.

### Эксплуатация и обслуживание

Диффузионный насос прост по конструкции и при правильной эксплуатации весьма надежен в работе.

Типичная схема вакуумной системы с пароструйным насосом представлена на рис. 2.13.

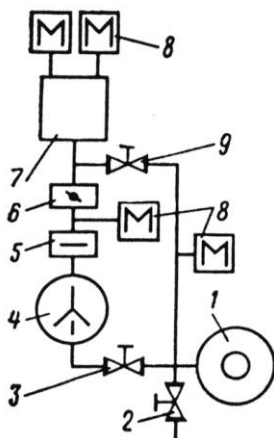


Рис. 2.13. Схема установки с диффузионным насосом:

- 1 — форвакуумный насос; 2 — напускной клапан; 3 — клапан;  
4 — диффузионный насос; 5 — ловушка; 6 — затвор; 7 — откачиваемый сосуд;  
8 — манометрические преобразователи; 9 — клапан байпасной линии откачки

Обязательными элементами системы являются форвакуумный насос (механический вакуумный насос с масляным уплотнением); напускной клапан 2; клапан 3, соединяющий форвакуумный насос с диффузионным насосом 4; затвор 6 и манометрические преобразователи 8, устанавливаемые на форвакуумной ли-

нии и рабочей камере установки, откачиваемый сосуд 7. В большинстве случаев перед затвором располагается ловушка 5 и между затвором и ловушкой (чаще всего в грибковом соединении основания затвора) — манометрические преобразователи. Откачиваемый сосуд связывается с низковакуумным насосом байпасной линией с клапаном 9.

Запуск насоса в работу осуществляется в следующей последовательности. Закрывают затвор над насосом, перекрывают клапан, соединяющий насос с форвакуумным насосом. Включают механический насос, убеждаются в его работоспособности. Открывают клапан, соединяющий его с диффузионным насосом. По известному предельному остаточному давлению механического насоса и давлению, полученному в испытуемом насосе, оценивают герметичность сборки всей системы. При необходимости отыскивают и устраняют течи.

После достижения необходимого предварительного разрежения подают воду для охлаждения корпуса диффузионного насоса и включают нагреватель насоса. Для сохранения в процессе эксплуатации вакуумных характеристик пароструйных насосов важное значение имеет строгое соблюдение правил эксплуатации. К основным правилам эксплуатации пароструйных насосов относятся соблюдение последовательности включения и выключения насоса; поддержание в заданных пределах мощности нагревателя, температуры и расхода охлаждающей воды, а также правильный выбор производительности форвакуумного насоса.

При номинальном расходе и температуре воды на входе в систему охлаждения около 20 °С температура воды на выходе из системы охлаждения на 2–3 °С выше температуры на входе. Эта разница температур практически линейно увеличивается с понижением расхода воды. При температуре воды на входе, равной 20 °С, насос сохраняет работоспособности при снижении расхода воды в 2–3 раза. Однако при этом уже заметно изменяются его вакуумные характеристики. При увеличении температуры охлаждающей воды с 20 до 30 °С предельное остаточное давление возрастает в 2 раза.

В процессе эксплуатации пароструйных насосов могут возникнуть различные аварийные ситуации. Если при этом своевременно принять необходимые меры, то это в значительной степе-

ни избавит от неизбежности восстановительных работ на установке. Например, при нарушении герметичности откачиваемого объекта необходимо закрыть затвор и после этого устранить течь. Когда течь будет устранена, после предварительной байпасной откачки рабочей камеры вновь открывают затвор и продолжают работу на установке. Быстрое закрытие затвора часто избавляет от внеочередной промывки насоса и рабочей камеры установки и в том случае, если в систему атмосферный воздух попал в больших количествах. При этом клапан, соединяющий пароструйный насос с форвакуумом, оставляют открытым и не прекращают подачу охлаждающей воды и электропитание нагревателя. После восстановления нормального режима работы и получасовой работы пароструйного насоса „на себя” продолжают работу на установке. При прекращении подачи охлаждающей воды закрывают затвор и обесточивают нагреватель. Если над насосом установлена охлаждаемая ловушка, необходимо ее разморозить. До полного размораживания ловушки и охлаждения насоса нельзя прекращать форвакуумную откачку.

При остановке форвакуумного насоса закрывают клапан, соединяющий пароструйный насос с механическим, и затвор, затем выключают нагреватель пароструйного насоса. При этом рекомендуется увеличить подачу воды для охлаждения пароструйного насоса.

## **2.5. Цеолитовые насосы**

Цеолитовые вакуумные насосы относятся к адсорбционным насосам. Их принцип действия основан на физической адсорбции газа кристаллическими пористыми алюмосиликатами, получившими название молекулярных сит или искусственных цеолитов. Цеолит представляет собой небольшие пористые гранулы примерно одинакового размера. Диаметр пор постоянен для цеолита определенного типа, но изменяется от типа к типу. Промышленностью выпускаются цеолиты типов 3A, 4A, 5A, 10X и 13X. Из них цеолит марки 5A обладает наибольшей сорбционной емкостью по отношению к воздуху. Диаметр его пор равен 0,5 нм, а внутренняя поверхность примерно в 40 000 раз превышает внешнюю поверхность гранулы.

Наиболее распространен насос ЦВН-1-2, схематично показанный на рис. 2.14. Насос представляет собой баллон, заполненный цеолитом и приспособленный для охлаждения жидким азотом. В баллон, образованный внешним металлическим цилиндром 7, внутренним цилиндром 2 и закрытый нижним кольцевым днищем 3 и двумя верхними сферическими днищами 4 и 5, до верхнего края внутреннего цилиндра засыпан цеолит, обычно марки 5А. В насос ЦВН-1-2 помещается 1 кг цеолита. Патрубком 6 баллон соединяется с фланцем 7, которым насос присоединяется к вакуумной системе. С целью снижения теплопроводности нижняя часть патрубка на длине 30–40 мм утончается до 0,3–0,5 мм. В средней части патрубка располагается патрубок 8, закрываемый резиновой пробкой 9. Баллон насоса помещается в сосуд Дьюара 10. При заполнении сосуда Дьюара жидким азотом и охлаждении цеолита он сорбирует газ, поступающий из откачиваемого сосуда. Благодаря патрубку 11 предотвращается образование газовой пробки во внутренней полости, что способствует эффективному охлаждению цеолита.

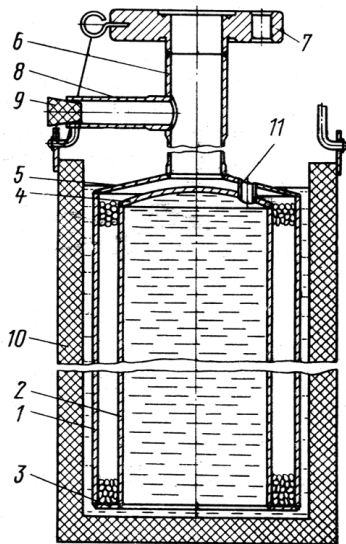


Рис. 2.14. Цеолитовый вакуумный насос ЦВН-1-2:

1 — внешний цилиндр; 2 — внутренний цилиндр; 3 — днище;  
4,5 — верхнее днище; 6,8,11 — патрубки; 7 — фланец; 9 — пробка;

Цеолитовый насос комплектуется печью (на рисунке не показана), которая устанавливается на место сосуда Дьюара при регенерации цеолита в насосе. Печь представляет собой двухстенный стакан, между стенками которого расположен проволочный нагреватель. Насос присоединяется к вакуумной системе через вакуумный клапан.

Цикл работы цеолитового насоса следующий. При закрытом клапане, соединяющем его с вакуумной системой, производят регенерацию, т. е. восстановление сорбционной активности, цеолита. Регенерация цеолита происходит при прогреве его при температуре 500 °С в течение 3-х часов. После регенерации печь заменяется сосудом Дьюара и насос охлаждается до температуры минус 196 °С. После охлаждения цеолита насос способен производить откачку. При насыщении цеолита откачиваемым газом производят его повторную регенерацию, для чего насос предварительно отделяется клапаном от откачиваемого сосуда.

Цеолитовые вакуумные насосы серийного производства предназначены для предварительной откачки от атмосферного давления систем с магниторазрядными или геттерно-ионными высоковакуумными насосами, а также для самостоятельной низковакуумной откачки систем, в которых не допускается присутствие паров рабочей жидкости насосов.

Часто, как показано на рис. 2.15, откачиваемый сосуд снабжается двумя цеолитовыми насосами. Это обеспечивает непрерывность откачки: в то время как один из насосов откачивает объем, в другом производится регенерация цеолита. Наличие трех клапанов позволяет производить любое соединение цеолитовых насосов. Вакуумные клапаны 3 и 4 могут быть как прогреваемыми, так и непрогреваемыми, клапан 5 почти всегда прогреваемый.

Для характеристики цеолитовых насосов неприемлемо понятие быстроты действия. Они характеризуются сорбционной емкостью. Цеолитовому насосу, как и любому адсорбционному насосу, свойственно насыщение, т. е. возможность поглощения вполне определенного количества газа при заданном давлении. Поэтому для достижения заданной величины давления объем откачиваемого сосуда не может превышать вполне определенной

величины. Так, например, с помощью насоса ЦВН-1-2 в сосуде объемом 100 л после откачки от атмосферного давления создается остаточное давление не более 6,6 Па. В составе остаточного газа преобладают инертные газы и совершенно отсутствуют углеводороды. Время откачки при 30-минутном предварительном охлаждении насоса не превышает 1 часа.

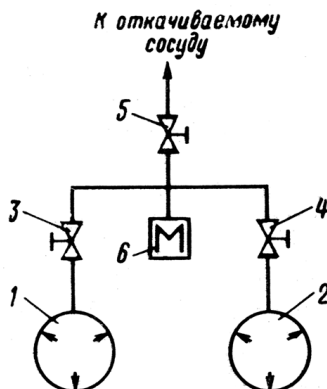


Рис. 2.15. Схема вакуумной системы с цеолитовыми насосами:  
1,2 — цеолитовые насосы; 3,4 и 5 — клапаны;  
6 — манометрический преобразователь

### Эксплуатация и обслуживание

Момент постановки насоса в вакуумную систему и момент использования его для откачки сосуда может разделять значительный промежуток времени. Поэтому перед началом работы насоса полезно провести повторную трехчасовую регенерацию цеолита. Регенерация производится при закрытом клапане, соединяющем его с вакуумной системой при отсутствии пробки в патрубке 5 (см. рис. 2.14). Перед выключением печи (или сразу после выключения) патрубков 8 плотно закрывают резиновой пробкой 9. Затем печь выключают и удаляют.

После охлаждения насоса до температуры, близкой к комнатной, под него подводят сосуд Дьюара так, чтобы баллон насоса полностью находился в сосуде Дьюара. В сосуд Дьюара заливают жидкий азот. После прекращения бурного кипения азота, что свидетельствует о том, что баллон и цеолит в нем охладились до температуры, близкой к минус 196 °С (температура кипения



жидкого азота), открывают вакуумный клапан 3 (или 4) и 5 (см. рис. 2.15), т. е. начинают откачку сосуда.

На первоначальное охлаждение насоса расходуется около 6 л жидкого азота. В дальнейшем расход жидкого азота составляет 0,5–0,6 л/ч. Уровень жидкого азота надо поддерживать на высоте верхнего края баллона, допуская понижение его на 15–20 мм. Большое понижение уровня вызывает десорбцию газа из верхних слоев цеолита и повышение давления. Повышение уровня приводит к увеличению расхода азота.

Цеолит марки 5А дает возможность получать остаточное давление не хуже 0,9 Па ( $7 \cdot 10^{-3}$  торр) при поглощении 1 г цеолита 20 см<sup>3</sup> влажного атмосферного воздуха комнатной температуры и не хуже 13 Па ( $10^{-1}$  торр) при поглощении 100 см<sup>3</sup>. Для достижения существенного понижения остаточного давления необходимо вести откачку сосуда последовательно двумя насосами.

При повторной откачке сосуда от атмосферного давления без регенерации цеолита установившееся остаточное давление будет выше (примерно на порядок). Допустимое количество регенераций достигает нескольких сотен.

Однако даже непродолжительный прогрев цеолита при температуре выше 550 °С приводит к его разрушению, в особенности если цеолит предварительно адсорбировал большое количество влаги. При разрушении цеолита, о чем можно судить по снижению сорбционной емкости, его необходимо заменить.

## **2.6. Магниторазрядные насосы**

Широкое распространение магниторазрядных насосов объясняется их высокими техническими характеристиками, простой эксплуатации и обслуживания, высокой надежностью и большим ресурсом работы. Основная откачка активных газов магниторазрядными насосами осуществляется в результате хемосорбции газов постоянно возобновляемой пленкой титана. Непременным условием эффективной и устойчивой работы магниторазрядных насосов, является соответствие количества распыляемого титана количеству поступающего газа. При приложении разности потенциалов между электродами разрядного блока, находящегося в вакууме, в ячейках насоса возникает электриче-

ский разряд. Для возникновения разряда достаточно случайного присутствия в разрядном промежутке нескольких электронов. Под действием сильного магнитного и электрического полей электроны движутся по спирали вокруг оси разрядной ячейки. На своем пути электроны производят ионизацию газа. Образующиеся положительные ионы, бомбардируя катод, распыляют титан из катодных пластин.

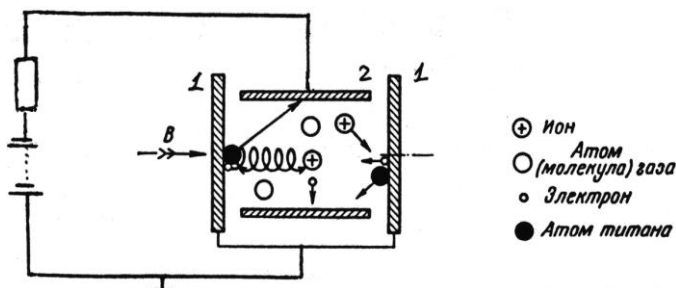


Рис. 2.16. Схема диодного магниторазрядного насоса:  
 1 — два элемента катода из титана; 2 — цилиндрический анод;  
 В — индукция магнитного поля

Поскольку основная часть распыляемых частиц титана представляет собой электрически нейтральные атомы и молекулы, они осаждаются на все поверхности электродов, но в основном на анод. Активные газы, попадая на непрерывно возобновляемую пленку титана, хемосорбируются ею. Катоды также поглощают газы, но из-за постоянного распыления большей части их поверхности вклад катодов в процесс откачки активных газов незначителен.

Количество распыляемого металла приблизительно пропорционально току (и, следовательно, давлению газа); это означает, что распыление металла саморегулируется в зависимости от состояния вакуума. Величина разрядного тока является в некоторой степени мерой давления в откачиваемой системе.

Для получения большей скорости откачки соединяют параллельно большое число откачивающих элементов. Обычно анод имеет ячейстую конструкцию (наподобие восковых сот), а катод состоит из двух титановых пластинок, расположенных по обе стороны анода.

Внедрение ионов инертных газов в материал катода сопровождается замуравыванием ионов распыляемым титаном. Такой механизм хотя и не создает большой быстроты действия, является основным при откачке инертных газов магниторазрядным насосом.

Поскольку химическая активность различных газов и эффективность распыления титана их ионами различны, быстрота действия магниторазрядных насосов существенно зависит от рода откачиваемого газа. Относительная быстрота действия магниторазрядных насосов по разным газам, выраженная в процентах от быстроты действия по воздуху, представлена в табл. 2.1.

Недостатком диодных магниторазрядных насосов является малая быстрота действия по инертным газам. Этот недостаток в меньшей степени присущ триодным магниторазрядным насосам, схема устройства которых показана на рис. 2.17.

Таблица 2.1

Относительная быстрота действия диодных магниторазрядных насосов по разным газам

Газ	Быстрота действия, %	Газ	Быстрота действия, %
Водород	250–350	Азот	100
Метан	300	Двуокись углерода	85
Аммиак	170	Кислород	55
Этиловый спирт	135	Гелий	10–20
Пары воды	130	Аргон, криптон, неон	1–4
Воздух	100		

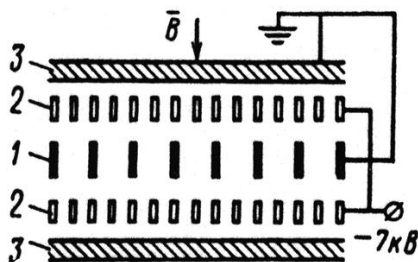


Рис. 2.17. Схема триодного магниторазрядного насоса:

1 — анод; 2 — катоды; 3 — коллектор (корпус насоса);

$\vec{B}$  — вектор напряженности магнитного поля

Электродный блок образует анод, располагаемый в середине, и два катода. Коллектором является корпус насоса. Катоды триодного насоса имеют ячеистую структуру, в силу чего положительные ионы, образующиеся в разряде при работе триодного насоса, бомбардируют катод не под прямым углом, как в диодном насосе, а под острым углом, что существенно увеличивает эффективность распыления титана, который равномерно осаждается на корпусе насоса. Благодаря триодной схеме и ячеистой структуре катодов часть ионов, движущихся из области анода, достигает коллектора (корпуса насоса). Ионы, достигнувшие коллектора, обладают малой энергией и не могут вызвать вторичного распыления титана с коллектора при их поглощении. Таким образом, благодаря однопотенциальной триодной схеме насос имеет повышенную быстроту действия по инертным газам. Например, по аргону она составляет  $1/3$  от быстроты действия по воздуху.

### Эксплуатация и обслуживание

Перед подключением необходимо проверить сопротивление утечки между анодами и катодами, которое должно быть не менее 1 ГОм.

После проверки насос устанавливают в вакуумную систему, снабженную средствами предварительной откачки, и устанавливают магниты. Магниты в насосе располагаются таким образом (см. рис. 2.18), что силовые магнитные линии замыкаются, проходя через все магниты и магнитопроводы. Боковые магниты, расположенные с боковых сторон насоса, приклеиваются на заводе-изготовителе к металлическому листу, являющемуся магнитопроводом. Центральные магниты, вставляемые в пазы корпуса насоса, склеиваются попарно. Устанавливать магниты удобнее в следующей последовательности. Вначале закрепляют на корпусе насоса боковые магниты. Перемена местами при установке пластин с боковыми магнитами не имеет значения, так как в любом случае вектор напряженности магнитного поля в насосе сохранит свое направление. Затем устанавливают центральные магниты. В результате взаимодействия магнитных полей боковых и устанавливаемого магнитов последний должен втягиваться в паз корпуса насоса. Если при установке магнит разворачивается, а после установки он выталкивается назад, то необходимо перевернуть

магнит. Затем охлаждаемые насосы подключают к системе подачи и слива воды. Подсоединяют блок питания. Создают предварительное разрежение и производят пробное включение насоса.

Длительность старта магниторазрядных насосов зависит от степени чистоты внутренних поверхностей откачиваемого сосуда и насоса, а также от степени предварительного разряжения. Допускается запуск неохлаждаемого магниторазрядного насоса с давлений более 10 Па (0,1 торр), но в таком случае длительность старта может превышать 3 часа. Если нет возможности создать лучшее предварительное разрежение, запуск насоса производят, не прекращая предварительной откачки. Средства предварительной откачки разобщают с откачиваемым сосудом и насосом после того, как стабильно начнет понижаться давление.

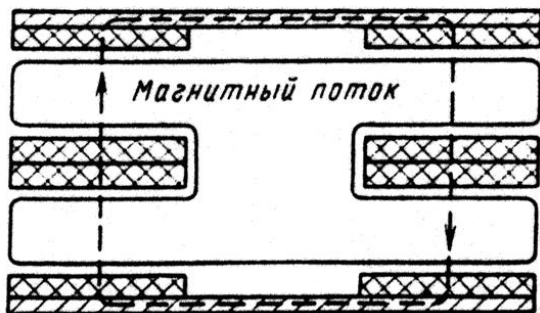


Рис. 2.18. Расположение магнитов в магниторазрядном насосе

Длительный старт не является особо опасным для магниторазрядных насосов. Это видно из рис. 2.19, на котором изображены энергетические характеристики насоса НОРД-250. Наиболее опасными являются давления  $10^{-2}$  Па ( $10^{-4}$  торр) для охлаждаемых и  $10^{-3} - 10^{-2}$  Па ( $10^{-5} - 10^{-4}$  торр) для неохлаждаемых насосов. Именно в этом диапазоне давлений насос потребляет максимальную мощность, которая рассеивается на электродах разрядных блоков, и приводит к их неравномерному нагреву и может привести к деформации корпуса насоса.

Достигаемое с помощью магниторазрядных насосов предельное остаточное давление зависит от предыстории насоса, суммарной наработки, режимов работы и рода откачиваемого газа. На предельное остаточное давление, так же, как и на дли-

тельность старта, сильное влияние оказывает загрязнение насоса углеводородами.

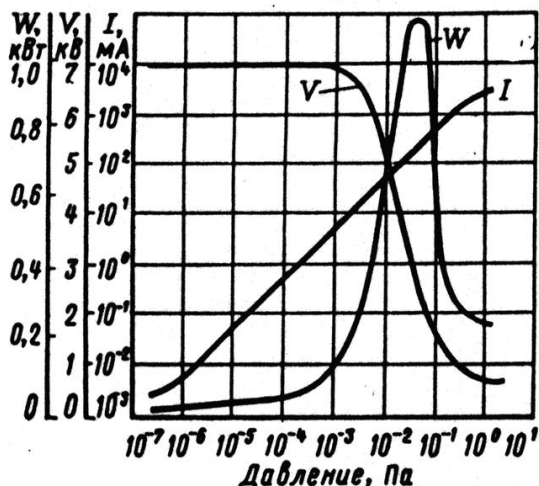


Рис.2.19. Энергетические характеристики:

ток разряда ( $I$ ), разность потенциалов на электродах ( $V$ ) и мощность ( $W$ ), потребляемая насосом НМДО-0,25 (НОРД-250), в зависимости от впускного давления

Например, создание предварительного разрежения с помощью механических насосов с масляным уплотнением повышает предельное остаточное давление в 5–10 раз. В последующем паспортное значение предельного остаточного давления может быть достигнуто после 10–20-часового прогрева насоса при откачке его цеолитовым насосом. Насос хорошо обезгаживается и восстанавливается и при прогреве его с откачкой механическим насосом с защитной ловушкой.

Опыт эксплуатации магниторазрядных насосов убеждает в практически неограниченном их ресурсе (~ 150 тыс. часов) при достаточной аккуратности обслуживающего персонала.

## ГЛАВА 3

### ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Неотъемлемой частью любой вакуумной системы является аппаратура для измерения давления разрежённого газа. Область давления, используемая в современной вакуумной технике,  $10^5 - 10^{-12}$  Па. Измерение давлений в таком широком диапазоне, естественно, не может быть обеспечено одним прибором. В практике измерения давления разрежённых газов применяются различные типы преобразователей, отличающиеся по принципу действия и классу точности.

Приборы для измерения общих давлений в вакуумной технике называются вакуумметрами и обычно состоят из двух частей — манометрического преобразователя и измерительной установки. По методу измерения вакуумметры могут быть разделены на абсолютные и относительные. Показания абсолютных приборов не зависят от вида газа и могут быть заранее рассчитаны.

Эти манометры измеряют давление, как силу ударов молекул о поверхность. При малых давлениях непосредственное измерение силы давления невозможно из-за её малости. В приборах для относительных измерений используют зависимость параметров некоторых физических процессов, протекающих в вакууме, от давления. Эти приборы нуждаются в градуировке по образцовым приборам. Вакуумметры измеряют давление газов, присут-

ствующих в вакуумной системе. На рис. 3.1. показаны диапазоны рабочих давлений различных типов вакуумметров.

### 3.1. Абсолютные вакуумметры

Гидростатический U-образный вакуумметр, внешний вид которого показан на рис. 3.2, представляет собой стеклянную U-образную трубку, заполненную ртутью или какой-либо другой жидкостью с низкой упругостью пара, например вакуумным маслом. Оба колена трубки соединены между собой трёхходовым стеклянным краном. В положении крана, изображённом на рисунке, оба колена сообщаются между собой. Правое колено соединяется со вспомогательным насосом, создающим разрежение  $10^{-1}$ – $1$  Па.



Рис. 3.1. Рабочие диапазоны давлений, измеряемые вакуумметрами

В процессе измерения это давление принимается равным нулю. При повороте рукоятки крана на  $180^\circ$  оба колена разобщаются между собой, а левое колено сообщается с сосудом, в котором необходимо измерить давление. Давление рассчитывается по формуле

$$P = \rho g h, \quad (3.1)$$

где  $\rho$  — плотность рабочей жидкости;  $g$  — ускорение свободного падения для данной местности;  $h$  — разность уровней рабочей жидкости в обоих коленах вакуумметра.



Диапазон давлений, измеряемых ртутным вакуумметром  $10^2 - 10^5$  Па (1–100 торр), масляным —  $1-5 \cdot 10^3$  Па (0,01–50 торр).

Компрессионный вакуумметр Мак-Леода схематично представлен на рис. 3.3. Компрессионным назван потому, что в нём осуществляется сжатие (компрессия) газа в запаянном капилляре. Основными элементами вакуумметра являются запаянный капилляр  $K_1$  с сосудом  $V_1$ , суммарный объём которых до точки  $a$  в процессе градуировки определяется с большой точностью, и сравнительный капилляр  $K_2$ , диаметр которого так же, как и запаянного капилляра, должен быть постоянен по всей длине и равен диаметру запаянного капилляра.

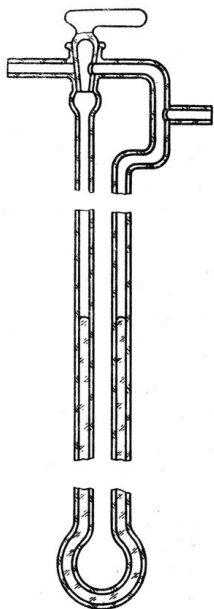


Рис. 3.2. U-образный манометр

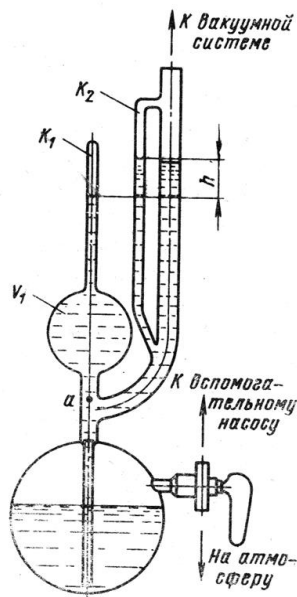


Рис. 3.3. Компрессионный манометр

Чтобы произвести измерение, понижают уровень ртути в вакуумметре ниже точки  $a$ . При этом измерительный капилляр  $K_1$

сообщается с системой, в которой необходимо измерить давление. При последующем повышении уровня ртути в вакуумметре порция газа, равная суммарному объёму измерительного капилляра  $K_1$  и сосуда  $V_1$ , при давлении, равном давлению газа в системе, будет отсечена и сжата в запаянном капилляре. По закону Бойля–Мариотта произведение давления определённой порции газа на объём, им занимаемый, есть величина постоянная:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2. \quad (3.2)$$

Начальный объём  $V_1$  известен, конечный объём  $V_2$  нетрудно рассчитать по известному диаметру капилляра  $K_1$ , а давление  $P_2$  определяется разностью уровней ртути  $h$  в измерительном  $K_1$  и сравнительном  $K_2$  капиллярах. Тогда по формуле (3.2.) легко рассчитывается искомое давление в вакуумной системе  $P_1$ .

Деформационные вакуумметры в качестве чувствительного элемента имеют герметичную упругую перегородку, способную деформироваться под действием приложенной к ней разности давлений. Наибольшее распространение получили вакуумметры типа МВП, устройство которых схематично показано на рис. 3.4. Упругим чувствительным элементом является трубка эллиптического сечения, свёрнутая в спираль. Трубка под действием атмосферного давления при откачке внутренней полости скручивается за счёт разных радиусов кривизны, а следовательно, площадей наружной и внутренней поверхности трубки. Один конец трубки с помощью штуцера присоединяется к вакуумной системе, другой, запаянный, конец трубки через систему рычагов соединён со стрелкой прибора. Угол закручивания упругого элемента и соответственно угол поворота стрелки пропорциональны разности давлений внутри и снаружи упругого элемента.

Деформационный вакуумметр обладает целым рядом преимуществ: удобства в работе с вакуумметром, непосредственность отсчёта, безынерционность. Наряду с этим ему присущ существенный недостаток: зависимость показаний вакуумметра от барометрического давления. Область давления, измеряемых деформационным вакуумметром, —  $5 \cdot 10^2 - 10^5$  Па ( $\sim 3-750$  торр). Кроме описанного, известны и другие типы деформационных ва-

куумметров, например мембранные, которые выпускаются для различных диапазонов измеряемых давлений.

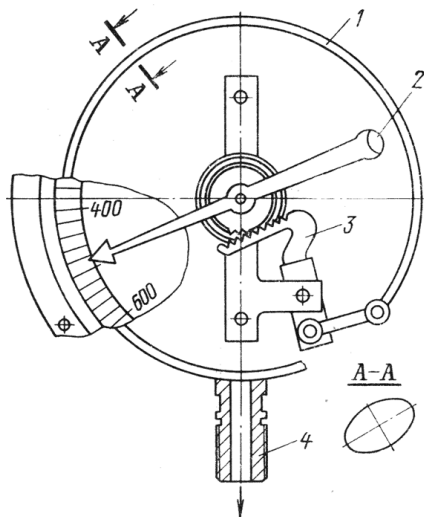


Рис. 3.4. Деформационный вакуумметр:

- 1 — труба эллиптического сечения;
- 2 — стрелка; 3 — зубчатый сектор;
- 4 — присоединительный штуцер.

## 3.2. Тепловые вакуумметры

Действие тепловых вакуумметров основано на зависимости теплопроводности газа от давления. Основными элементами любого теплоэлектрического манометрического преобразователя являются нить накала (с постоянной температурой и большой теплоемкостью) и корпус прибора. При постоянной электрической мощности, подведённой к нити  $Q_{эл.}$ , температура нити зависит от давления. В стационарном состоянии при установившейся температуре нити имеет место баланс мощностей:

$$Q_{эл} = Q_{к} + Q_{л} + Q_{м}, \quad (3.3)$$

где  $Q_k$  — мощность теплоотвода по конструктивным элементам манометра;  $Q_m$  — мощность, отводимая от нити соударяющимися с ней молекулами;  $Q_{\text{л}}$  — мощность, отводимая лучеиспусканием.

Поскольку с ростом давления коэффициент теплопроводности газа увеличивается, то и увеличиваются  $Q_m$ . Следовательно, при  $Q_{\text{эл}} = \text{const}$  равновесная температура нити возрастает при понижении давления (если  $l_0 \gg d$ ). Поэтому в тепловом манометре измеряется температура нити и результаты измерений градуируются в единицах давления.

На рис. 3.5, 3.6 представлены конструкции наиболее распространённых типов тепловых манометров и схемы их включения. Преобразователи в зависимости от способа измерения температуры делятся на термопарные и преобразователи сопротивления.

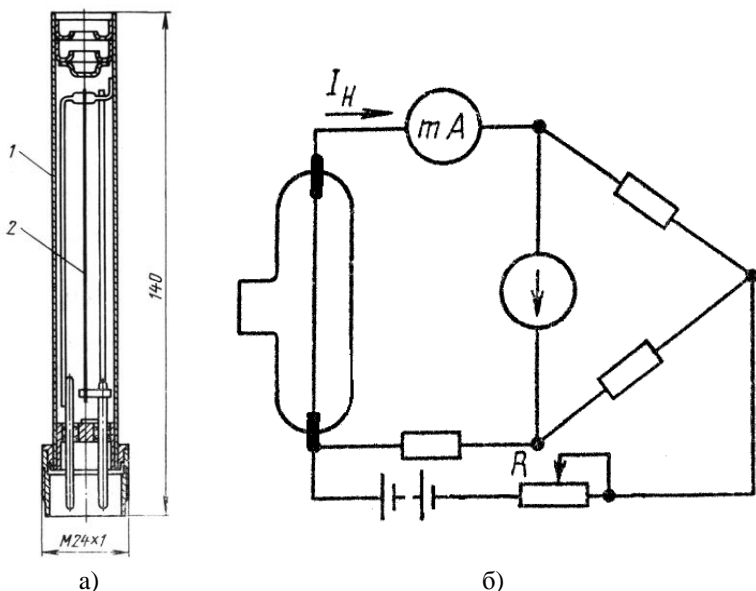


Рис. 3.5. Манометрический преобразователь сопротивления ПМТ-6:

а) конструкция; б) схема измерения

1 — корпус; 2 — нить накала

Корпус преобразователя ПМТ-6 (рис. 3.5а) изготавливается из нержавеющей стали, нить накала — из вольфрамовой проволоки диаметром 10 мкм и длиной 80 мм. Манометр работает в режиме постоянной температуры нити, равной 220 °С. При этом сопротивление нити составляет 116,5 Ом. Манометр включен в одно из плеч моста (рис. 3.5б). Изменение сигнала, свидетельствующее об изменении давления, регистрируется стрелочным прибором. При изменении давления от  $10^{-2}$  до 30 торр ток накала нити изменяется от 4 до 52 мА, а напряжение от 0,5 до 6 В.

В диапазоне давлений от 1 до  $10^{-3}$  торр наиболее широко применяются термопарные манометры (рис. 3.6).

Нить накала в этом манометре выполняет только функцию источника тепла. Лампа работает в режиме постоянного тока накала, который регулируется перестройкой балластного резистора. Давление оценивается по ЭДС. термопары (рис. 3.7). Ток накала составляет 110–135 мА и подбирается таким образом, чтобы стрелка милливольтметра точно совпадала с сотым делением шкалы.

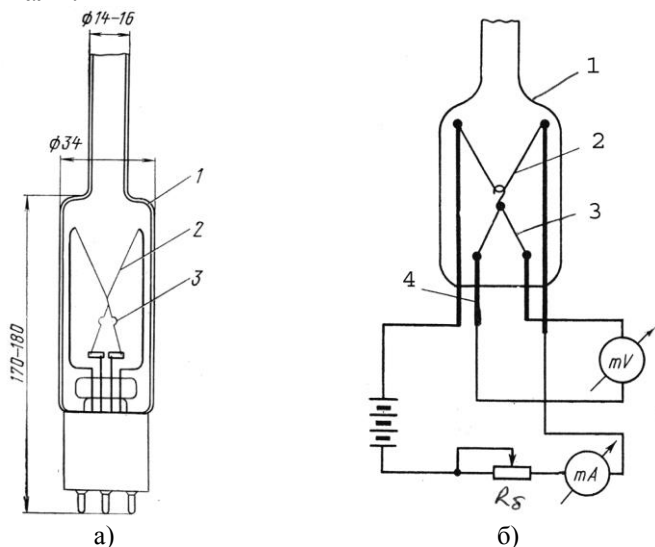


Рис 3.6. Термопарный манометрический преобразователь ПМТ-2:

а) конструкция; б) схема измерения.

1 — корпус; 2 — нить накала; 3 — термопара; 4 — ввод питания

При давлении ниже  $10^{-3}$  торр показания манометра достигают асимптотического предела 10 мВ (100 делений). При этих давлениях теплоотвод по газу пренебрежимо мал, и вся подводимая мощность расходуется на излучение ( $\sim 63\%$ ) и теплоотвод по вводам ( $\sim 37\%$ ).

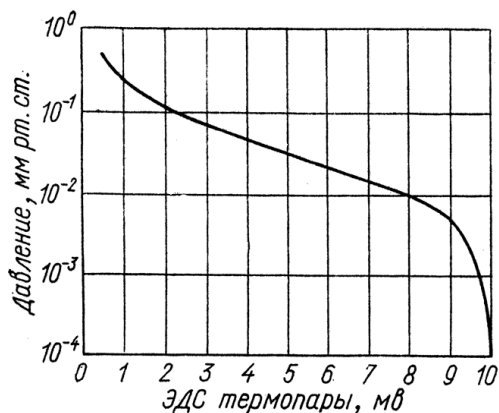


Рис. 3.7. Градуировочная кривая термопарного манометра ПМТ-2

Верхний предел термопарных манометров определяется двумя явлениями: 1) при высоком давлении нарушается условие  $l_0/d \gg 1$ , и теплопроводность газа перестает зависеть от давления; 2) при высоком давлении интенсивный молекулярный теплоотвод сильно снижает температуру нити, уменьшает разность температур нити накала и корпуса и приводит к потере чувствительности.

При токе около 120 мА лампа ПМТ-2 имеет верхний предел по давлению примерно  $10^{-1}$  торр. Для борьбы с потерей чувствительности при высоком давлении достаточно увеличить температуру нити, т.е. повысить ток накала. При токе 250–300 мА лампа ПМТ-2 может измерять давления в диапазоне  $10^{-1}$ –1 торр. Для этого диапазона точное значение тока накала подбирают при атмосферном давлении, т.е. производится привязка градуировочной кривой к правому верхнему асимптотическому пределу ма-

нометра. Датчики тепловых вакуумметров не боятся прорыва атмосферы и имеют практически неограниченный срок службы.

### 3.3. Электронные ионизационные вакуумметры

Принцип действия электронного преобразователя основан на прямой пропорциональности между давлением и ионным током, образовавшимся в результате ионизации термоэлектронами остаточных газов.

Существуют две схемы электронного преобразователя: с внутренним и внешним коллектором. Основными элементами электронного ионизационного манометрического преобразователя являются прямонакальный катод, анод-сетка и коллектор ионов. Катод может располагаться как в центре сетки-анода, например, в преобразователях ПМИ-3-2 и ПМТ-2 (рис. 3.8а), так и с внешней стороны, например, в преобразователе ПМИ-12-8 и ИМ-12 (рис. 3.8б). В первом случае коллектор охватывает анод; во втором — коллектор располагается по оси преобразователя.

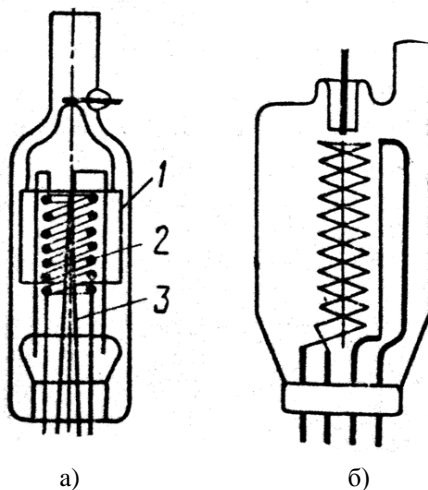


Рис. 3.7. Конструктивные схемы электронных ионизационных преобразователей:

- а) с внешним коллектором (ПМИ-2; ПМИ-3-2);
- б) с внутренним коллектором (ИМ-12; ПМИ-12-8);
- 1 — коллектор; 2 — сетка-анод; 3 — прямонакальный катод



Электрические потенциалы электродов таковы, что создают для электронов ускоряющую разность потенциалов в пространстве между анодом и катодом и замедляющую разность потенциалов в пространстве между анодом и коллектором ионов, причём замедляющая разность потенциалов по величине больше ускоряющей разности потенциалов. Обычно коллектор имеет нулевой потенциал, анод – высокий положительный, катод – небольшой положительный потенциал. Питание манометрического преобразователя осуществляется измерительным блоком вакуумметра.

Электронный ионизационный манометрический преобразователь действует следующим образом. Накаленный прямым пропусканьем тока катод испускает электроны. Электроны ускоряются в пространстве между катодом и анодом. Большинство электронов пролетает анод-сетку, попадая в замедляющее электрическое поле. Поскольку замедляющая разность потенциалов больше ускоряющей разности потенциалов, электроны, не долетая до коллектора ионов, изменяют направление движения. Затем, приобретая скорость в направлении к аноду, электроны вновь пролетают анод-сетку, тормозятся около катода и вновь направляются к аноду. Таким образом, электроны совершают колебательные движения около анода.

На своём пути электроны производят ионизацию газа. Положительные ионы, образовавшиеся в пространстве между анодом и коллектором ионов, притягиваются последним. При постоянном токе электронной эмиссии (Эмиссионный ток в рассматриваемых вакуумметрах устанавливается на уровне 5 мА.) постоянном числе электронов, колеблющихся около анода, количество актов ионизации, т.е. количество образующихся ионов, будет пропорциональным концентрации молекул газа в пространстве, т.е. давлению. Таким образом, ионный ток коллектора служит мерой давления газа. Электронный преобразователь имеет неодинаковую чувствительность к различным газам, так как эффективность ионизации зависит от рода газа.

Если преобразователь был проградуирован по воздуху, а применяется для измерения давления других газов, то необходимо учитывать относительную чувствительность  $R$ , которая представлена в таблице 3.1.

При этом давление газа определяется как

$$P_{\text{газа}} = P_{\text{воздуха}}/R. \quad (3.4)$$

Таблица 3.1

Относительная чувствительность преобразователей

Газ	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	He	Ar	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Hg	CH <sub>4</sub>	Ne	CO
R	1	0,43	0,16	1,30	1,6	0,85	2,5	1,5	0,27	1,04

Ионизационные манометры обладают откачивающим действием. Для ламп ПМИ-2 быстрота ионной откачки составляет примерно 0,01 л/с. Верхний предел электронного манометра (10<sup>-2</sup>торр) связан быстрым распылением вольфрамового катода. Кроме того, при высоком давлении нарушается линейная зависимость тока от давления, когда средняя длина свободного пробега электрона в объёме прибора становится меньше расстояния между электронами. Увеличение верхнего предела измерения можно достичь за счёт применения специальных воздухостойких иридиевых катодов, а также за счёт уменьшения расстояния между электродами.

Нижний предел измерения определяется фоновыми токами в цепи коллектора. Фоновые токи возникают либо в результате мягкого рентгеновского излучения анодной сетки, либо, как следствие, автоэлектронной эмиссии коллектора и ультрафиолетового излучения накального катода, сопровождающихся уходом с коллектора фотоэлектронов. Рентгеновское излучение анодной сетки является результатом её бомбардировки электронами. Автоэлектронная эмиссия коллектора появляется под действием разности потенциалов 200–300 В между коллектором и анодной сеткой. В лампе ПМИ-2 цилиндрический коллектор захватывает почти все рентгеновское излучение сетки, по этому нижний предел измерения манометров с внешним коллектором типа ПМИ-2 составляет 10<sup>-7</sup> торр.

Фоновые токи имеют одинаковое направление с ионными токами и оказывают одинаковое воздействие на измерительные приборы. Для уменьшения фоновых токов был предложен преобразователь с осевым коллектором (рис. 3.8б), где катод и коллек-

тор поменялись местами, что значительно уменьшило телесный угол, в котором рентгеновское излучение сетки попадает на коллектор, что расширило нижний предел измерения до  $10^{-10}$  торр.

Для точного измерения низкого давления необходимо производить обезгаживание анода, которое производится пропуском через него электрического тока. Обезгаживание преобразователей следует производить при низком давлении в системе за 20–40 мин до измерения давления. В обезгаживании преобразователя при высоких давлениях нет необходимости, так как в этом случае относительная ошибка, вызванная сорбционно-десорбционными явлениями, обычно невелика. Более того, обезгаживание и, как правило, нагрев при высоких давлениях повышают интенсивность химических процессов на электродах, что ведёт к ускоренному выходу из строя преобразователя. В связи с этим следует считать неправильной практику начала обезгаживания сразу после включения преобразователя, когда в установке ещё не достигнут высокий вакуум.

Измерения давления с помощью манометрических преобразователей открытого типа, электронная система которых расположена непосредственно в откачиваемом сосуде, даёт большее соответствие с истинным давлением в системе, чем при использовании преобразователей закрытого типа.

Для более точного суждения по показаниям вакуумметра о давлении в системе в области низких давлений необходимо учитывать состав газа, чтобы ввести поправку на различную чувствительность преобразователя к разным газам. Следует помнить, что такие газы, как кислород или пары воды, содержащие кислород, вызывают уменьшение тока эмиссии, отравляя катод. Наоборот, пары углеводородов вызывают резкое увеличение тока эмиссии. Поэтому непосредственно перед измерением всегда проверяют ток эмиссии.

### **3.4. Магнитные газоразрядные вакуумметры**

Принцип действия магнитных преобразователей основан на зависимости тока самостоятельного газового разряда в скрещенных магнитом и электрическом полях от давления:

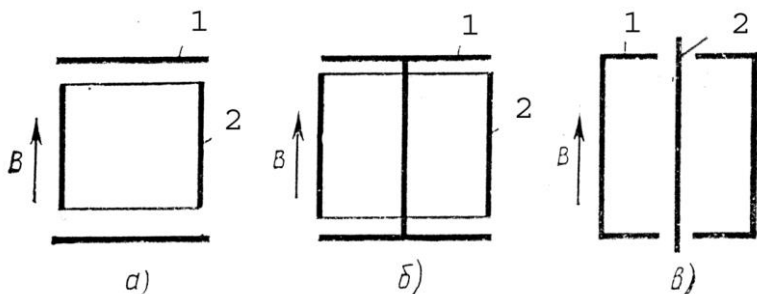


Рис. 3.8. Электронные системы магнитных преобразователей:  
 а) ячейка Пеннинга; б) магнетронная; в) инверсно-магнетронная;  
 1 — катоды; 2 — аноды

Электродные системы, обеспечивающие поддержание самостоятельного газового разряда при высоком и сверхвысоком вакууме, бывают нескольких видов.

Ячейка Пеннинга (рис. 3.9) состоит из двух дисковых катодов 1 и цилиндрического анода 2; в магнетронном преобразователе (рис. 3.9б) в отличие от ячейки Пеннинга катоды соединены между собой центральным стержнем; в инверсно-магнетронном преобразователе (рис. 3.9в) центральный стержень выполняет роль анода, а наружный цилиндр становится катодом.

Все электроды находятся в постоянном магнитном поле. На анод подаётся положительное относительно катода напряжение 2–6 кВ, катод заземлён и соединяется со входом усилителя постоянного тока. Сильное магнитное поле служит для увеличения длины пути электронов и поддержания тем самым разряда и увеличения степени ионизации газа. Сила тока разряда в таких приборах является мерой давления в системе.

В последнее время инверсно-магнетронные вакуумметры приобретают всё большее распространение. В качестве примера приведём конструкцию инверсно-магнетронного преобразователя ПММ-32-1 (рис. 3.10)

Электронная система преобразователя на фланце соединения с металлическим уплотнителем с условным проходом 50 мм. Катод 1 представляет собой цилиндр с закрытыми торцами.

Стержневой анод 2 проходит по оси катода через отверстия в его торцевых поверхностях. Вся электродная система в корпусе прибора помещается в осевое магнитное поле. На анод подаётся высокое напряжение. В цепь катода включается вход усилителя постоянного тока.

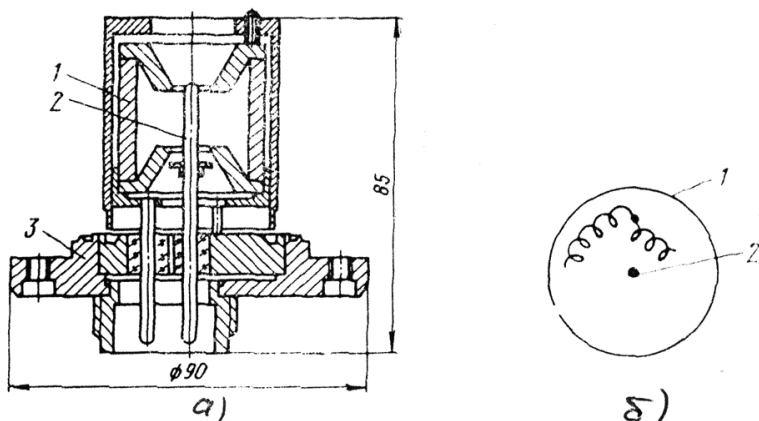


Рис. 3.10. Инверсно-магнетронный манометрический преобразователь ПММ-32-1:

- а) конструкция преобразователя:  
 1 – катод; 2 – анод; 3 – присоединительный фланец;  
 б) траектория электронов

Под действием скрещивающихся электрического и магнитного полей свободные электроны, образовавшиеся в разрядном промежутке, движутся по замкнутым гипоциклоидам. При столкновении с молекулой газа электрон теряет часть энергии, и его траектория смещается ближе к аноду, как это показано на рис. 3.10б. Электроны попадают на анод, производя по меньшей мере один акт ионизации газа. В таких манометрических преобразователях разряд поддерживается при давлениях до  $10^{-12} - 10^{-11}$  Па ( $10^{-14} - 10^{-13}$  торр). Образовавшиеся в результате ионизации газа положительные ионы в силу своей большой массы практически прямолинейно движутся к катоду, являющемуся одновременно коллектором ионов. По величине ионного тока судят о концентрации молекул газа в разрядном промежутке преобразователя,

т.е. о давлении газа в системе. Фоновые токи, токи автоэлектронной эмиссии в измерительной цепи катода не регистрируются, поскольку они замыкаются в цепи экран-анод.

Быстрота откачки колеблется для различных преобразователей в зависимости от рода газа и режимов работы в пределах от  $10^{-2}$  до 1л/с, что значительно больше, чем для электронных. Это приводит к увеличению погрешности измерений при наличии вакуумного сопротивления между преобразователем и вакуумной камерой. Преимуществом магнитного преобразователя перед электронным является более высокая надежность а работе в связи с заменой накального катода холодным, а недостатком – нестабильности, связанные с колебаниями работы выхода электронов при загрязнении катодов. Эти нестабильности особенно заметны при работе преобразователя в вакуумных системах с парами масла, продукты разложения которого при ионной бомбардировке и масляные диэлектрические плёнки, покрывающие поверхности электродов, могут в несколько раз уменьшать чувствительность преобразователя.

Обезгаживание магниторазрядных преобразователей, так же, как и электронных, следует производить при высоком вакууме и только в том случае, если необходимо измерить давление в области высокого и сверхвысокого вакуума. Некоторое время после обезгаживания преобразователь обладает сильным откачивающим действием. Ошибка, вызванная откачивающим действием, для открытых преобразователей может достигать несколько процентов, для преобразователей закрытого типа – 20% и более. Ошибка измерения, вызванная газовыделением имеет противоположный знак и по величине обычно намного превосходит ошибку, вызванную откачивающим действием прибора.

Показания вакуумметра также зависят от состояния преобразователя и напряжённости магнитного поля. Поэтому во избежание изменения напряженности магнитного поля к преобразователям нельзя подносить ферромагнитные тела на расстояние менее 100 мм. В процессе эксплуатации необходимо периодически контролировать сопротивление утечки изоляторов, обуславливающие дополнительный фоновый ток, а также полезно контролировать напряжённость магнитного поля.

## ГЛАВА 4

### ТЕЧЕИСКАНИЕ

В вакуумной технике под течеисканием понимается совокупность средств, методов и способов обнаружения течей и установления степени герметичности вакуумных систем.

Место нарушения целостности оболочки называют течью. Это обычно микропоры в самом материале оболочки и в сварных швах, риски на рабочей поверхности фланцев и металлических уплотнителей, образующие сквозной канал с выходом на обе стороны оболочки. Величина течи, так же, как и степень герметичности, характеризуется потоком воздуха, перетекающего через течь в единицу времени при нормальных условиях.

В вакуумной технике количество газа, натекающего в систему, часто характеризуют произведением объема проникшего газа  $V$  на его давление  $P$ . Количество газа, проникшего в систему, деленное на время натекания, определяет поток газа.

В системе СИ основными единицами объема, давления и времени являются метр кубический ( $\text{м}^3$ ), паскаль, равный ньютону, деленному на метр квадратный ( $\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$ ) и секунда (с). Отсюда поток будет выражаться:

$$\frac{[\text{м}^3] \left[ \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right]}{[\text{с}]} = \frac{[\text{Н} \cdot \text{м}]}{[\text{с}]} = \frac{[\text{Дж}]}{[\text{с}]} = [\text{Вт}].$$

До настоящего времени в вакуумной технике, в частности, в течеискании, еще широко применяется в качестве единицы измерения потока газа литр на микрон ртутного столба в секунду (л·мкм рт. ст/с), равный  $1,33 \cdot 10^4$  Вт.

Требования к степени герметичности вакуумной системы определяются величиной максимально допустимого натекания в систему. При контроле герметичности изделия следует различать две основные технологические операции:

1) контроль герметичности — технологическая операция, служащая для установления степени герметичности изделия;

2) поиск течи — операция, заключающаяся в обнаружении и установлении мест расположения единичных течей.

Для установления степени герметичности системы с одной стороны оболочки подают пробное вещество — газ или жидкость, легко выделяемые (идентифицируемые) в окружающей среде или в составе остаточного газа. С другой стороны, оболочки фиксируют появление и количественное изменение содержания пробного вещества.

По способу создания потока и идентификации пробного вещества различают следующие методы контроля герметичности: метод опрессовки, люминесцентный метод, метод искрового разряда, манометрический метод, галогенный метод, масс-спектрометрический метод и некоторые другие. В вакуумной технике наибольшее распространение получили масс-спектрометрический и манометрический методы в различных модификациях.

## **4.1. Манометрический метод**

Для поиска течей могут быть использованы любые манометрические преобразователи, показания которых зависят от рода газа, например, электронные ионизационные и теплоэлектрические. Поиск течей сводится к следующему. После установления давления в вакуумной системе подозреваемое в натекании место обдувают пробным газом или смачивают жидким пробным веществом. Изменение показаний вакуумметра свидетельствует о



наличии течи. Наибольший эффект дает работа с жидкими пробными веществами: ацетоном, спиртом и эфирами. Небольшие количества жидкости, проникшие в вакуумную систему через течь, испаряясь в вакууме, резко увеличивают общее давление в системе.

Поиск течей с помощью жидких пробных веществ наряду с большой эффективностью имеет свои неудобства. Подъем жидкости по капилляру малых течей, меньших  $10^{-7}$  Вт ( $10^{-3}$  л·ммкн рт. ст/с), происходит за время от нескольких минут до нескольких часов. Поэтому вакуумметр может среагировать на пробное вещество в тот момент, когда будет обследоваться уже другой участок поверхности. Тем самым возникнет ложное представление о месте расположения течи. Чтобы убедиться в правильности обнаружения места расположения течи, удаляют пробное вещество (если имеется возможность, прогревают контролируемую поверхность, например, легким пламенем горелки) и после установления давления в системе повторяют испытания.

Минимальная величина течей, выявляемых манометрическим методом, зависит от общего давления в системе, которое в данном случае является фоном. По мере обнаружения и устранения течей установившееся давление в системе понижается и соответственно повышается вероятность обнаружения все более малых течей.

Поиск течей целесообразно вести, когда стрелка вакуумметра находится в конце шкалы прибора. Если стрелка вакуумметра находится в начале шкалы, целесообразно несколько снизить быстроту откачки, прикрыв высоковакуумный затвор, и переключить вакуумметр на более грубый диапазон. При этом относительная минимальная регистрируемая величина изменения показаний вакуумметра будет увеличена.

## 4.2. Масс-спектрометрический метод

Наиболее распространенным в вакуумной технике методом контроля герметичности и поиска течей является масс-спектрометрический метод, обладающий высокой чувствительностью. Сущность метода заключается в регистрации прохожде-

ния через оболочку пробного вещества с помощью масс-спектрометра, настроенного на данное пробное вещество. Отечественной промышленностью выпускается серия масс-спектрометрических течеискателей и измерителей концентрации, настроенных на гелий. Основным элементом течеискателя является масс-спектрометрический анализатор, представляющий собой масс-спектрометр с магнитным отклонением пучка ионов.

Принцип действия демонстрируется на рис 4.1, на котором показана масс-спектрометрическая камера течеискателя, предназначенного для работы с гелием в качестве пробного газа. Электроны, эмиттируемые катодом 9, попадают в камеру ионизации 8. Источник питания катода 11 подключен к анализатору через фланец 10. В случае негерметичности вакуумной системы, обдуваемой пробным газом, молекулы гелия через фланец 5 проникают в камеру ионизации. Положительные ионы гелия ускоряющим напряжением направляются в камеру магнитного анализатора 6. Ускоряющее напряжение  $E_y$  и магнитная индукция  $B$  подбираются таким образом, чтобы ионы гелия, прошедшие через входную щель 7, двигаясь по траектории 4, попали в выходную щель 2. Остаточные газы по траектории 3 разряжаются на стенках анализатора.

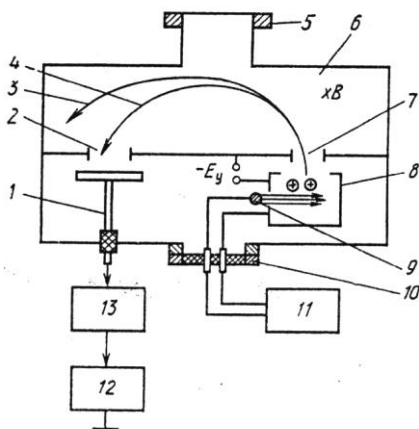


Рис. 4.1. Масс-спектрометрическая камера течеискателя

В отличие от анализаторов парциальных давлений, которые должны иметь высокую разрешающую способность и перестраиваться на различные массовые числа, датчик течеискателя настраивается только на пробный газ. При этом входная и выходная щели могут быть расширены, что увеличивает чувствительность течеискателя. Этот способ повышения чувствительности можно применять для гелия, не имеющего в составе воздуха веществ с близкими массовыми числами.

Коллектор ионов 1 соединяется с электрометрическим каскадом 13, усиливающим падение напряжения на высокоомном сопротивлении. Блок измерения ионного тока 12 после дополнительного усиления выходного сигнала электрометрического каскада выводит результаты измерений на стрелочный прибор или самописец.

Схема типового течеискателя представлена на рис. 4.2. Пароструйный и механический насосы служат для создания и поддержания в камере течеискателя давления  $2,5 \cdot 10^{-3} - 2,5 \cdot 10^{-2}$  Па ( $2,5 \cdot 10^{-5} - 2,5 \cdot 10^{-4}$  торр). Напряжение на нагревателе пароструйного насоса регулируется автотрансформатором.

Заливная азотная ловушка предназначена для предотвращения попадания паров рабочей жидкости насосов в масс-спектрометрическую камеру, а также для защиты камеры от загрязнения ее конденсирующимися парами и газами, поступающими от испытуемого объекта. Дросселирующий клапан Ду-32 (поз. 6) служит для сообщения объекта испытаний с вакуумной системой течеисагеля. Клапан Ду-25 (поз. 5) служит для отделения масс-спектрометрической камеры от вакуумной системы течеискателя. Необходимость в этом возникает, например, при замене катода или чистке камеры. Трехходовые клапаны Ду-8 (поз. 7, 2, 3 и 4) служат для управления форвакуумной и предварительной (байпасной) откачкой вакуумной системы механическим насосом, а также для напуска атмосферы в вакуумную систему.

Клапаны устроены так, что два канала клапана на рисунке, расположенные в горизонтальной плоскости, постоянно сообщаются между собой, образуя один сквозной канал. Третий канал может закрываться и открываться, сообщая соответствующие участки вакуумной системы с линией низковакуумной откачки.

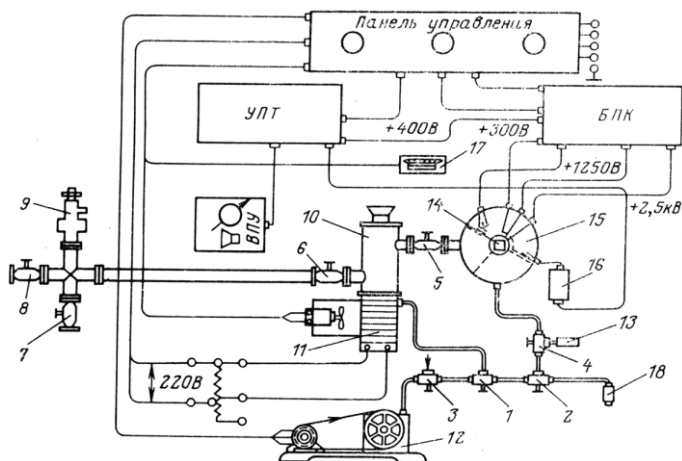


Рис. 4.2. Схема гелиевого течеискателя:

1–8 — клапаны; 9 — натекаль; 10 — вымораживающая ловушка; 11 — диффузионный паромасляный насос; 12 — механический вакуумный насос с масляным уплотнением; 13 — калиброванная гелиевая течь; 14 — магниторазрядный манометрический преобразователь; 15 — масс-спектрометрическая камера; 16 — выносной электроизмерительный каскад; 17 — вентилятор электронных блоков; 18 — термопарный манометрический преобразователь; «Панель управления» — основная панель управления, содержащая приборы и переключатели, необходимые для управления работой течеискателя и измерения «ускоряющего напряжения», «тока эмиссии», давления в системе и напряжения на нагревателе диффузионного насоса; УПТ — усилитель постоянного тока; ВПК — блок питания масс-спектрометрической камеры и магниторазрядного манометрического преобразователя; ВПУ — выносной пульт управления

Включение течеискателя осуществляется в следующей последовательности. Проверяют, все ли клапаны закрыты. Включают общее питание течеискателя. Включают механический насос. Включают термопарный вакуумметр. После достижения необходимого разряжения в форвакуумной линии открывают клапан «Пароструйный насос». Включают нагреватель пароструйного насоса, устанавливают необходимое напряжение питания нагревателя. Включают усилитель постоянного тока. Времени выхода на режим диффузионного насоса бывает достаточно и для прогрева электроизмерительного блока. Спустя 30–35 мин с начала

включения течеискателя заливают жидкий азот в ловушку. О том, что в диффузионном насосе полностью сформировались струи и началась высоковакуумная откачка, можно судить по величине давления в форвакуумной линии. По прошествии 40–45 мин с момента включения диффузионного насоса, времени, достаточного для его разогрева, закрывают клапан «Пароструйный насос», открывают клапан «Камера», производят предварительную откачку масс-спектрометрической камеры. Во избежание сильного замасливания масс-спектрометрической камеры не следует долго оставлять камеру под откачкой механическим насосом. После достижения в ней давления 5–8 Па ( $\sim 5 \cdot 10^{-2}$  торр) следует закрыть клапан «Камера» и открыть клапан «Пароструйный насос». После этого открывают клапан между масс-спектрометрической камерой и диффузионным насосом. При последующем выключении течеискателя масс-спектрометрическую камеру оставляют «под вакуумом». Тогда в дальнейшем отпадает необходимость в предварительной откачке камеры механическим насосом, соответственно уменьшается загрязнение ее парами масла механического насоса. (Для удобства работы полезно маховик клапана 5, расположенного между камерой и диффузионным насосом, вынести выше верхней крышки течеискателя.)

Выключение течеискателя осуществляется в обратной последовательности. При этом следует помнить, что ловушку необходимо полностью разморозить при откачке ее диффузионным насосом. При размораживании ловушки клапан 5 должен быть уже закрыт. Клапан «Пароструйный насос» закрывается при остывании нижней части насоса до температуры 60–80 °С. После выключения механического насоса необходимо открыть клапан «Атмосфера», напустить атмосферный воздух в форвакуумную линию и закрыть клапан. Перед началом испытаний новой партии приборов необходимо произвести градуировку течеискателя. Градуировку следует производить при рабочем давлении в камере с помощью диффузионной гелиевой течи «Гелит», встроенной в течеискатель. Для этого закрывают клапан Ду-32 (поз. 6), выключают катод ионного источника, выключают магнитный электроразрядный вакуумметр, предварительно переключив его на шкалу 2500 мкА. Разобщают масс-спектрометрическую камеру с

высоковакуумной откачкой закрытием клапана Ду-25 (поз. 5). Откачивают гелиевую течь до давления 2,5–5 Па ( $\sim 2 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-2}$  торр), открыв для этого клапаны «Камера» и «Гелиевая течь». Закрывают клапан «Камера» и открывают клапан Ду-25 (поз. 5). Включают магниторазрядный вакуумметр и откачивают камеру до давления  $2,5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$  Т (50–80 мкА по шкале магниторазрядного вакуумметра). Включают катод ионного источника и фиксируют установившиеся показания От стрелочного прибора выносного пульта управления ВПУ. Закрывают клапан «Гелиевая течь». При этом отсчет течеискателя начнет уменьшаться. Рассчитывают чувствительность течеискателя к потоку гелия по формуле

$$S_Q = \frac{Q}{\alpha_T - \alpha_\Phi}, \quad (4.1)$$

где  $S_Q$  — чувствительность течеискателя к потоку гелия;  $Q$  — величина потока гелия калиброванной гелиевой течи.

Чем меньше численная величина  $S_Q$ , тем лучше, так как это означает, что меньшему потоку гелия, поступающему в течеискатель, будет соответствовать больший отсчет течеискателя.

Градуировка течеискателей, в которых отсутствует встроенная течь, осуществляется следующим образом. Через клапан 8 к течеискателю подсоединяется калиброванная гелиевая течь. Через клапан 7 подсоединяется вспомогательный насос. Течеискатель включается в рабочий режим. Вспомогательным насосом через клапаны 7 и 8 производится откачка гелиевой течи до давления 2,5–5 Па ( $2 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-2}$  торр). Выключается катод масс-спектрометрической камеры. Закрывается клапан 7, открывается дросселирующий клапан 6 течеискателя. Выключается вспомогательный насос. После установления давления в камере фиксируют показания течеискателя  $\alpha_T$ . Закрывают клапан 8 и после стабилизации показаний течеискателя фиксируют фон  $\alpha_\Phi$ . Закрывают клапан 6. Производят расчет чувствительности течеискателя.

Хотя градуировка течеискателя производится по потоку гелия, в действительности его масс-спектрометрический анализатор определяет концентрацию гелия в камере. Соответствие

установившейся концентрации гелия в камере и потока гелия, поступающего в течеискатель, устанавливается известной формулой:

$$P_r = \frac{Q_r}{S_r}, \quad (4.2)$$

где  $P_r$  — давление гелия в камере;  $Q_r$  — поток гелия в течеискатель;  $S_r$  — быстрота откачки камеры по гелию.

Изменение быстроты действия диффузионного насоса по гелию в зависимости от мощности подогрева насоса открывает возможности для регулирования чувствительности течеискателя. При снижении мощности подогрева снижается быстрота действия по гелию. При этом быстрота действия по воздуху в широком диапазоне остается практически постоянной. Это позволяет повысить чувствительность течеискателя в результате увеличения давления гелия в камере при том же потоке гелия и сохранении общего давления в камере. При изменении мощности, подводимой к нагревателю пароструйного насоса, должна быть произведена повторная градуировка течеискателя.

С помощью гелиевого течеискателя может производиться как контроль герметичности, так и поиск течей. Для повышения достоверности и обеспечения большей точности измерений градуировку течеискателя следует производить, при рабочем давлении в камере, давлении, которое будет в процессе испытаний.

Предельные возможности течеискателя характеризуются минимальным потоком гелия, который регистрируется течеискателем:

$$Q = 2\Delta\alpha_\Phi S_Q, \quad (4.3)$$

где  $2\Delta\alpha_\Phi$  — отсчет течеискателя, принимаемый за достоверный;  $\Delta\alpha_\Phi$  — максимальная амплитуда флуктуаций фона.

Расширения предельных возможностей течеискателя (снижения  $Q_{\min}$ ) можно достичь повышением его чувствительности (снижением численного значения  $S_Q$ ) в результате снижения мощности подогрева пароструйного насоса. Однако следует иметь в виду, что одновременно с повышением чувствительности

повышается флуктуация фона. Так, увеличение чувствительности при снижении напряжения на нагревателе насоса ниже 180 В полностью компенсируется увеличением флуктуаций фона течеискателя.

С помощью масс-спектрометрического течеискателя контроль герметичности и поиск течей осуществляются способами обдува и гелиевых чехлов (камер), способом шупа, барокамеры, вакуумных присосок и способом накопления. Способ обдува и гелиевых чехлов в основном применяется для испытаний вакуумных систем с собственными средствами откачки и элементов вакуумных систем. В этом случае на наружную поверхность изделия подается пробный газ. Во внутренней полости изделия создается разрежение и фиксируется проникновение в нее пробного газа.

Способы шупа, барокамеры и вакуумных присосок применяются для испытаний изделий, в которых нельзя или нецелесообразно создавать разрежение. В этом случае в изделии создается избыточное давление пробного газа и фиксируется проникновение его на наружную поверхность. Способом вакуумных присосок, кроме того, могут быть испытаны изделия без замкнутой оболочки, например листы металла на целостность. Способ накопления может явиться разновидностью любого из перечисленных способов, за исключением, пожалуй, способа шупа.

В вакуумной технике наибольшее распространение получили способы обдува и гелиевых чехлов, причем первый обычно применяется для поиска течей, второй для контроля герметичности. В обоих случаях вакуумная система течеискателя соединяется с вакуумной системой испытываемой установки. Рекомендуется подключать течеискатель в форвакуумную линию испытываемой установки, как показано на рис. 4.3. Такое подключение обеспечивает максимальную чувствительность испытаний. Подсоединять вакуумную систему течеискателя к испытываемой установке лучше всего гибким металлическим шлангом, при отсутствии такового — резиновым вакуумным шлангом.



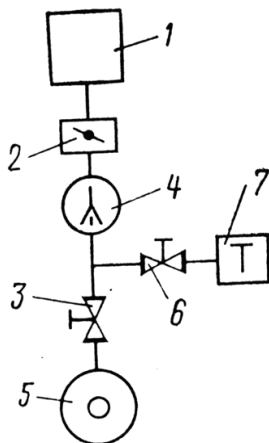


Рис. 4.3. Схема присоединения течеискателя при испытаниях вакуумных систем способом обдува и гелиевых камер (чехлов):

- 1 — рабочая камера установки ; 2 — затвор; 3 — клапан;  
 4 — высоковакуумный насос; 5 — форвакуумный насос;  
 6 — дросселирующий клапан; 7 — течеискатель

Испытания проводятся в следующей последовательности. В испытываемой установке создают рабочее давление. При создании разрежения в вакуумной системе трубопровод, соединяющий вакуумную установку с течеискателем, также должен быть откачан. Затем открывают клапан 6 и устанавливают рабочее давление в масс-спектрометрической камере течеискателя. Если клапан 6 полностью открыт и показания магниторазрядного вакуумметра течеискателя меньше 350 мкА, закрывают клапан 3, направляя весь поток газа, откачиваемого высоковакуумным насосом установки через вакуумную систему течеискателя. Включают катод масс-спектрометрической камеры течеискателя. Далее производят обдув гелием, начиная с той точки рабочей камеры установки, которая наиболее удалена по схеме вакуумной системы испытываемой установки от низковакуумного насоса и находится выше других в пространстве, постепенно приближаясь к низковакуумному насосу как по схеме вакуумной системы, так и по расположению в пространстве обследуемых участков оболочки вакуумной системы.

Обдув производят с помощью обдувателя, входящего в комплект течеискателя, присоединяемого к баллону с гелием. На практике не всегда имеется возможность разместить поблизости баллон с гелием. Тогда удобно пользоваться медицинской кислородной подушкой, заполненной гелием. При отсутствии обдувателя в качестве такового может быть использована игла от медицинского шприца или тонкая, сплюснутая на конце металлическая трубка.

Проводя испытания разветвленных вакуумных систем с большой длиной соединительных трубопроводов способом обдува, необходимо учитывать временные характеристики течеискателя и высоковакуумного насоса испытываемой установки. Начиная с момента поднесения струи гелия к течи, содержание его в рабочей камере испытываемой установки увеличивается. Общее количество гелия в высоковакуумной части испытываемой установки определится разностью потоков гелия, поступающего через течь и удаляемого в результате откачки.

Для установления максимальной концентрации пробного газа в датчике необходимо некоторое время. При постоянном перемещении щупа по поверхности поступление пробного газа в датчик начнет уменьшаться в результате удаления его от течи прежде, чем будет достигнута максимальная концентрация. Характер изменения во времени концентрации пробного газа в датчике показан на рис. 4.4. Момент времени  $t_1$  соответствует прохождению щупа над течью. Таким образом, реакция течеискателя и соответственно чувствительность испытаний зависят от степени приближения щупа к контролируемой поверхности и от скорости перемещения щупа. Максимальная чувствительность испытаний, равная чувствительности течеискателя, достигается в том случае, если остановить щуп над течью.

Рекомендуемая скорость перемещения щупа 1 см/с. Щуп должен находиться на расстоянии 0,5 мм от контролируемой поверхности для большинства реальных условий испытаний. Снижение скорости перемещения неоправданно увеличит длительность испытаний; увеличение скорости перемещения обдувателя может привести к пропуску малых течей. Способ щупа в масс-спектрометрическом методе, так же как и способ обдува, приме-

няется для поиска течей. Для осуществления этого способа к течеискателю через вакуумный шланг присоединяется шуп. Устанавливается такой поток газа через шуп, чтобы в масс-спектрометрической камере течеискателя поддерживалось рабочее давление. Испытания проводятся так же, как и испытания с применением галогенного течеискателя.

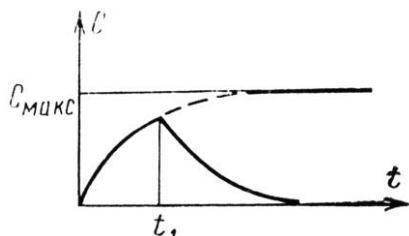


Рис. 4.4. Изменение во времени концентрации пробного газа в датчике течеискателя

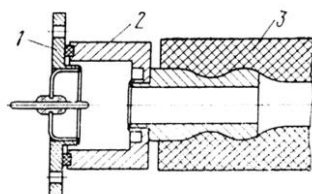


Рис. 4.5. Контроль герметичности электрического ввода с помощью присоски:  
1 — проверяемое изделие;  
2 — вакуумная присоска;  
3 — вакуумный шланг

Способ барокамеры отличается тем, что изделие, заполненное пробным газом, помещается в барокамеру, в которой создается разрежение и к которой подключается течеискатель. Этим способом осуществляются операции контроля герметичности, позволяющие численно охарактеризовать суммарное истечение пробного газа из изделия.

Способ вакуумных присосок нашел широкое распространение в вакуумной технике для контроля герметичности элементов вакуумных систем в процессе их изготовления. Испытания способом вакуумных присосок проводятся обязательно со вспомогательным низковакуумным насосом, который подсоединяется через клапан 7 (см. рис. 4.1). Через клапан 8 гибким шлангом присоединяется к течеискателю вакуумная присоска. Конструкция вакуумных присосок бывает самая различная в зависимости от формы проверяемых поверхностей. Для проверки плоскости это обычно металлический лист необходимого контура с приклеенным к нему по контуру резиновым уплотнителем достаточно

большой высоты. Наибольшее распространение получили присоски в виде металлического стакана (рис. 4.5).

Испытания проводятся в следующей последовательности. Испытуемое изделие слегка прижимают к уплотнителю присоски. Вспомогательным насосом производят откачку внутренней полости присоски. При этом атмосферное давление прижимает испытуемое изделие к присоске, обеспечивая надежное уплотнение. Плавно открывают дросселирующий клапан течеискателя. Закрывают клапан, сообщающий присоску со вспомогательным насосом. Проводят испытания.

В зависимости от цели испытания — поиск течи или контроль герметичности — обдувают испытуемое изделие гелием или создают вокруг него гелиевую камеру.

Часто для увеличения надежности создания уплотнения поверхности соприкосновения испытуемого изделия и уплотнителя присоски смачивают вакуумным маслом или спиртом. Чрезмерное смачивание вредно, так как случайно может быть перекрыта течь. Смачивать лучше только торцевую поверхность уплотнителя.

Для осуществления способа накопления к клапану 7 (см. рис. 4.1) присоединяют вспомогательный насос с относительно большой быстротой действия по воздуху и малой быстротой действия по гелию, например, цеолитовый насос. Дросселирующий клапан 6 течеискателя заменяют клапаном с малым временем открытия и закрытия, например, клапаном с эксцентриковым приводом. Эксцентриковый клапан можно ставить и последовательно с клапаном в течеискателе. Испытуемое изделие присоединяют непосредственно к клапану 8 или через короткий трубопровод. В соединительной коммуникации между испытуемым изделием, вспомогательным насосом и течеискателем устанавливают средства измерения давления.

Способ накопления обычно совмещают со способом гелиевых камер. Испытания проводят в следующей последовательности. В крупносерийном производстве испытуемое изделие помещают в герметичную камеру. В лабораторной практике и в единичном производстве вокруг присоединенного к течеискателю испытуемого изделия создают чехол, например, из полиэтилена

или другого аналогичного материала. Край чехла дальше проверяемой поверхности закрепляют липкой полихлорвиниловой лентой. Затем включают течеискатель (течеискатель может быть включен заранее). При закрытом эксцентриковом клапане откачивают испытуемое изделие до давления не выше рабочего давления в масс-спектрометрической камере течеискателя. Открывают эксцентриковый клапан. Фиксируют фоновый отсчет течеискателя. Закрывают эксцентриковый клапан. В камеру (или чехол) под незначительным избыточным давлением подают пробный газ — гелий. Фиксируют время его подачи. По истечении времени накопления открывают эксцентриковый клапан и фиксируют максимальный отсчет течеискателя. По разности показаний течеискателя оценивают величину натекания гелия в изделие.

Перед испытаниями производят градуировку течеискателя. Для этого на изделии устанавливают калиброванную гелиевую течь. Последовательность операций при градуировке аналогична последовательности при испытаниях. Как и при испытаниях, фоновым отсчетом являются установившиеся показания течеискателя при открытом эксцентриковом клапане. Применением способа накопления можно в десятки и сотни раз повысить чувствительность испытаний, проводимых с применением масс-спектрометрического течеискателя методами обдува и гелиевой камеры.

## Г Л А В А 5

### Элементы вакуумных систем

#### 5.1. Разборные вакуумные соединения

В разборных вакуумных соединениях необходимо обеспечить герметичность стыка двух соединяемых деталей, близкую к герметичности сплошного материала. В месте соприкосновения двух деталей в результате механической обработки всегда остаются микронеровности, которые затрудняют получение вакуумно-герметичного соединения.

Герметичность может быть достигнута значительно легче, если в зазор между соединяемыми материалами поместить уплотнитель, вязкость которого достаточна для заполнения неровностей при контактных напряжениях, значительно меньших предела упругости основных соединяемых материалов.

В качестве уплотнителей могут применяться смазки, резины, фторопласт, металлы. К разным вакуумным соединениям предъявляются следующие требования: минимальное натекание и газовыделение; механическая прочность; термическая стойкость — способность выдерживать многократные прогревы без нарушения герметичности; коррозионная стойкость; максимальное число циклов разборки и сборки с сохранением герметичности; удобство ремонта и технологичность в изготовлении; возможность лёгкой проверки на герметичность.

В вакуумной технике в системах с температурой прогрева до 300 °С широко применяются резиновые уплотнители. Резина

обладает хорошими упругими свойствами, и для создания вакуумно-герметичного соединения с полированной стальной поверхностью требуются небольшие усилия. Для прокладки шириной 4 мм удельное усилие уплотнения 4–8 Н/мм, что соответствует удельным давлению 1–2 МПа. Резиновые уплотнения допускают практически неограниченное число разборок и сборки, просты в изготовлении, редко нуждаются в ремонте. Недостатком резиновых уплотнений является повышенное газовыделение и газопроницаемость по сравнению с материалом уплотняемых деталей.

Форма сечения уплотнителя круглая или квадратная, диаметр или сторону квадрата из конструктивных соображений выбирают 3–5 мм.

Форма фланцев и расположение уплотнителя во фланцевых соединениях с эластомерным уплотнителем показаны на рис. 5.1 и 5.2.

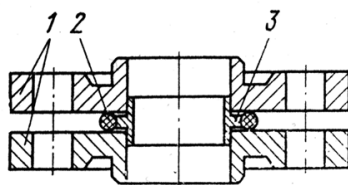


Рис. 5.1. Фланцевое соединение с плоскими фланцами:  
1 — фланцы; 2 — уплотнитель; 3 — центрирующее кольцо

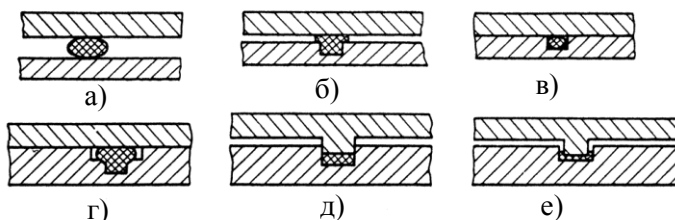


Рис. 5.2. Профили уплотняющих элементов фланцев с помещёнными между ними эластомерными уплотнителями

Эластомерный уплотнитель допускает многократную сборку соединения. Большим ресурсом обладают соединения со сжатыми уплотнителями, в которых ограничено смыкание фланцев

(рис. 5.2в,г). Напротив, меньшим ресурсом обладают соединения, изображённые на рис. 5.2а,б.

Наибольшую герметичность обеспечивают соединения с объёмно сжатым уплотнителем, например, изображённый на рис. 5.2д. Объёмное сжатие уплотнителя может быть реализовано в соединении, изображённом на рис. 5.2в. Определяя необходимое для этого сечение уплотнителя, следует помнить, что резину надо рассматривать как несжимаемый материал. Площадь сечения уплотнителя, как правило, круглого, должна составлять 90–95% площади сечения канавки под уплотнитель.

Величина сжатия уплотнителя по высоте, гарантирующая герметичное соединение при комнатной температуре, оценивается в 20–25% высоты уплотнителя, при высоких плюсовых и минусовых температурах — 30–35%.

Для работы при сверхнизких температурах, температурах сжижения газов наиболее надёжны фланцевые и штуцерные соединения с тонким фторопластовым уплотнителем, например соединение, изображённое на рис. 5.2е.

Для быстрого соединения фланцев вместо обычных болтов иногда применяются съёмное ярмо клинообразного профиля, стягивающее оба фланца, а также поворотные винты с захватами (рис. 5.3б; рис. 5.3а).

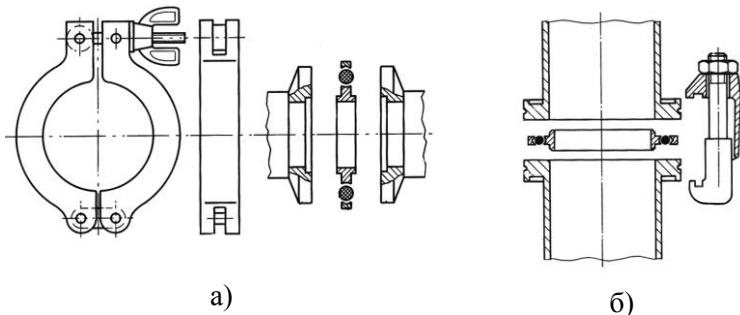


Рис. 5.3. быстро разъёмные фланцевые соединения:

а) клиновидным быстроразъёмным зажимом;

б) соединение фланцев при помощи винтов с захватами

Через фланцевое соединение с резиновым уплотнителем газ натекает в систему как по поверхности соприкосновения уплот-



нителя с фланцем, так и в результате диффузии через уплотнитель. Течение газа по поверхности соприкосновения уплотнителя с фланцем прекращается при сжатии уплотнителя на 10–20% по высоте. При эксплуатации таких фланцевых соединений необходимо соблюдать определённые меры по обеспечению сохранности соединения. Не допускается появление радиальных рисок на поверхности фланцев в месте расположения уплотнителя. Поверхности фланцев, обращённые в вакуумную полость, должны отвечать требованиям вакуумной гигиены.

Выделяющиеся из резины в процессе эксплуатации соединения смолистые вещества налипают на поверхности фланцев, на которых в результате этого скапливаются различные загрязнения и вырывающиеся из уплотнителя кусочки резины. При каждой разборке соединения поверхности фланцев должны быть очищены от этих загрязнений чистой бязью, смоченной в бензине.

Поскольку фланцы соединения в большинстве случаев изготавливают из обычной углеродистой стали, нередко случаи появления ржавчины на рабочих поверхностях фланцев. При разборке следы ржавчины должны быть удалены мелкой наждачной бумагой. Если на рабочей поверхности появились глубокие радиальные риски, поверхность фланца протачивают на токарном станке на глубину риски.

При эксплуатации фланцевых соединений с резиновым уплотнителем наряду с натеканием газа по соединению имеет место газовыделение из резины. Поэтому перед постановкой в вакуумную систему уплотнитель полезно обезгазить. Известно, что величина газовыделения из уплотнителя возрастает с ростом температуры. При длительном нагреве в вакууме газовыделение постепенно снижается, достигая практически постоянной величины. При последующем охлаждении газовыделение резко снижается до величины, много меньшей первоначального газовыделения при той же температуре. На этом основан способ предварительного обезгаживания резиновых уплотнителей. При обезгаживании уплотнители нагревают в вакууме до максимальной рабочей или несколько большей температуры и выдерживают при этой температуре 10–15 часов.

Для соединения трубопровода малого диаметра используют различные разновидности штуцерных соединений (рис. 5.4).

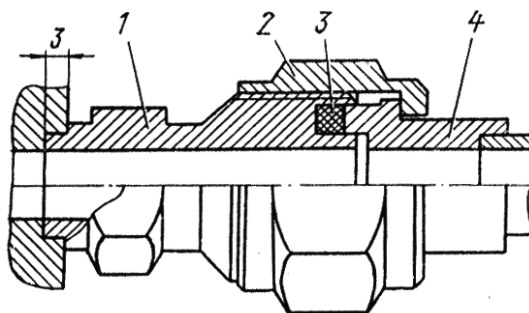


Рис. 5.4. Штуцерное соединение с эластомерным уплотнителем:  
1 — штуцер; 2 — гайка; 3 — уплотнитель; 4 — ниппель

В лабораторной практике для присоединения форвакуумного насоса к трубопроводу часто используется резиновый вакуумный шланг (рис. 5.5.) Желательно концы трубопроводов на длину 1,5–2,0 диаметра расточить, как показано на рисунке. Для выполнения соединения используют, резиновый шланг, внутренний диаметр которого в полтора раза меньше внешнего диаметра трубопровода, а длина составляет 4–6 диаметров трубопровода.

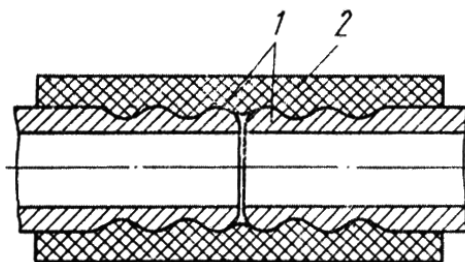


Рис. 5.5. Соединение трубопроводов с помощью резинового вакуумного шланга:  
1 — трубопровод; 2 — шланг

Для техники сверхвысокого вакуума большое значение имеют металлические уплотнения, допускающий прогрев до температуры 450–500 °С. Заполнение микронеровностей происходит за счёт пластической деформации материала прокладки. Текучесть металлов значительно меньше, чем у резины, и поэтому для

создания уплотнения требуются значительно большие удельные давления и более высокий класс чистоты поверхности. Газовыделение металлических прокладок в  $10^3$  раз меньше, чем резиновых, но соединение с металлическими прокладками сложнее в изготовлении, допускает ограниченное число прогрева и сборок. Схемы наиболее распространённых у нас в стране металлических уплотнений показаны на рис. 5.6.

В качестве уплотнителей применяется в основном медь, имеющая близкий коэффициент линейного расширения к нержавеющей стали. Также используются золото, алюминий, индий. Такие уплотнители, кроме индия, сохраняют работоспособность и герметичность после многих циклов нагрева. Впрочем, после первого нагрева иногда бывает необходима дополнительная подтяжка соединения.

Эксплуатация фланцевых соединений с металлическим уплотнителем сопряжена с необходимостью соблюдения определённых мер предосторожности от повреждения уплотняющих поверхностей.

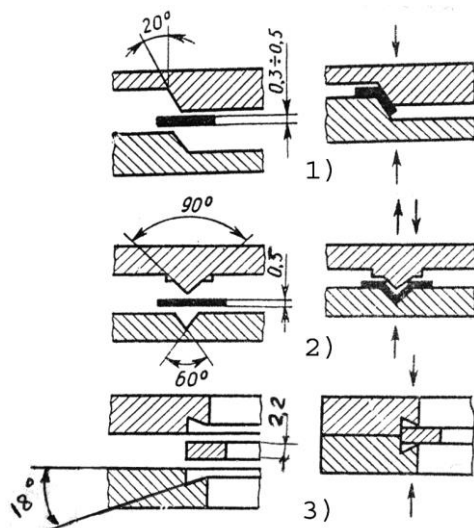


Рис. 5.6. Схемы уплотнений с металлическими прокладками:

1 — конусное; 2 — канавочно-клиновые; 3 — conflat

Наиболее подвержена повреждениям рабочая поверхность фланцев, в особенности поверхность зуба канавочно-клинового соединения. Однако вмятины, образовавшиеся на поверхности самого зуба, например, при случайном ударе, не представляют особой опасности. Их осторожно выравнивают шабером и зачищают оселком. Основными уплотняющими элементами канавочно-клинового соединения являются заплечики по краям зуба и гладкая поверхность фланца с канавкой на расстоянии 1,5 мм от канавки. Любое нарушение этих поверхностей ведёт к нарушению герметичности соединения.

Преимуществами соединения типа conflat являются:

- снижение вероятности повреждения уплотняющих поверхностей, вследствие того, что они находятся в углублении;
- оба фланца имеют одинаковую геометрию, что снижает их стоимость и, обеспечивает взаимозаменяемость;
- для обеспечения уплотнения достаточно небольшой деформации медной прокладки, поэтому прокладку можно использовать несколько раз.

Для удобства в работе и обеспечения равномерности затяжки соединения все болты должны иметь одинаковый шаг резьбы. К тому же, если есть возможность, болты лучше заменить шпильками, причём в прогреваемых системах следует применять сульфидированные болты (шпильки) и гайки из нержавеющей стали.

В процессе многократных нагревов может произойти диффузионная сварка уплотнителя с поверхностью фланцев. Кроме того, деформированный уплотнитель в ряде случаев оказывает расклинивающее действие. В результате разъединение фланцев оказывается затруднительным. Поэтому в одном из фланцев канавочно-клинового соединения имеются два резьбовых отверстия для отжимных болтов, с помощью которых фланцы легко разъединяются. Другими способами разъединения фланцев пользоваться не рекомендуется во избежание порчи соединения.

Во фланцах типа conflat для этих целей имеются специальные клиновидные канавки.

Хотя уплотнители способны обеспечить герметичность при нескольких сборках, рекомендуется заменять уплотнитель после каждой сборки.

## 5.2. Электрические вакуумные вводы

Для питания электрическим током различных устройств, работающих внутри вакуумной камеры, необходимы герметичные электрические вводы, изолированные от корпуса вакуумной камеры. В зависимости от назначения электрические вводы могут быть низковольтными или высоковольтными, низковакуумными или высоковакуумными.

Принципиально любой электрический вакуумный ввод состоит из трёх частей (рис. 5.7): соответственно токоввода (1), изолятора (2), который электрически изолирует токоввод от корпуса вакуумной камеры (3).

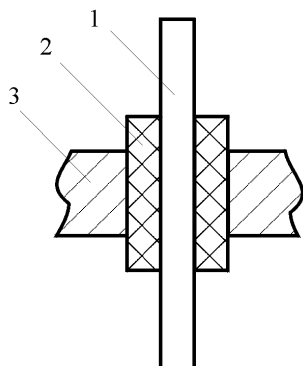


Рис. 5.7. Принципиальная схема электрического вакуумного ввода:  
1 — токоввод; 2 — изолятор; 3 — корпус

В стеклянных и металлокерамических приборах роль изолятора и корпуса совпадает.

Промышленностью выпускается широкий спектр электрических вакуумных вводов, которые отличаются по материалам изоляторов количеству и конструкции вводов.

На рис. 5.8 представлена конструкция наиболее часто применяемых в нашей лаборатории электрических металлокерамических вакуумных вводов, предназначенных для использования в сверхвысоковакуумных системах.



Рис. 5.8. Конструкция электрического вакуумного ввода:  
1 — стержень из нержавеющей стали; 2,4 — втулки из кобальта;  
3 — керамический изолятор

Рабочее напряжение такого ввода непосредственно зависит от диаметра и высоты керамического изолятора. Высоковольтный ввод (рис. 5.8) приваривается к основанию нижней втулкой (4). Керамический изолятор (3) соединяется со втулками (2) и (4) твёрдыми припоями. Стержень (1) приваривается к втулке (2) аргонодуговой или лазерной сваркой. Следует заметить, что высоковольтные вводы обладают малыми электрическими утечками, поэтому иногда могут использоваться в измерительных цепях.

### 5.3. Смотровые окна

Смотровые окна служат для наблюдения за устройствами, установленными внутри вакуумной установки, а также для освещения или облучения устройств установки. Смотровые окна изготавливаются из материалов, оптически прозрачных в соответствующих участках спектра. При давлениях выше  $5 \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст. широко применяются смотровые окна с резиновыми уплотнителями. Конструкция такого смотрового окна показана на рис. 5.9.

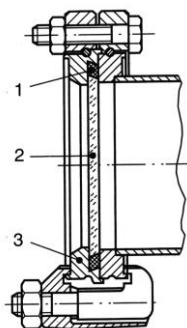


Рис. 5.9. Смотровое окно с резиновым уплотнением

Полированный стеклянный диск 2 с помощью нажимного кольца 3 прижимается к резиновому уплотнителю 1. При проведении в вакуумном объёме термических операций, связанных с тепловыми излучениями, стеклянный диск изготавливается из тугоплавкого стекла. В установках со сверхвысоким вакуумом употребляются смотровые окна без резиновых уплотнителей, как показано на рис. 5.10.

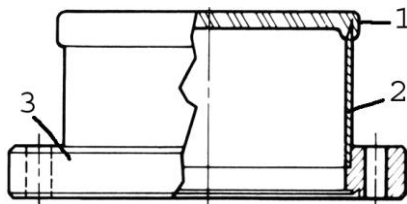


Рис. 5.10. Смотровое окно для сверхвысокого вакуума

Стеклянная шайба 1 приварена к коваровому стакану 2, сваренному в свою очередь с фланцем 3 из нержавеющей стали. Фланец уплотняется с вакуумным объёмом через металлическую прокладку. Для предотвращения разрушения соединения стекла с металлом при затяжке металлического уплотнения необходимо предусматривать разгрузочные канавки. Смотровые окна подобной конструкции допускают прогрев до 300–450 °С.

#### 5.4. Устройства для передачи движения в вакуум

Необходимость в устройствах для передачи в вакуум появляется в связи с тем, что привод механизмов удобнее размещать вне вакуумной камеры. Это связано с трудностью или невозможностью обезгаживания приборов, а также с размещением элементов контроля: линеек, нониусов и т.д.

Устройства для передачи движения в вакуум делятся на три группы: 1) для передачи возвратно-поступательного движения; 2) для передачи качательного движения; 3) для передачи вращательного движения. Внутри каждой группы также возможна классификация по предельному давлению, передаваемому усилию, скорости перемещения, величине хода и т.д.

При конструировании любых вводов движения в вакууме следует стремиться, чтобы герметизирующий элемент не воспринимал передаваемых усилий, а направляющие и опоры были бы по возможности расположены вне вакуумной камеры. Для пар трения, размещённых в вакууме, следует принимать специальные меры против схватывания трущихся материалов. С этой целью в качестве смазки можно применять дисульфид молибдена  $\text{MoS}_2$ , сульфидировать поверхности трения или использовать материалы, сильно отличающиеся по своим физическим свойствам, например, металл и керамику.

Для низкого и среднего вакуума используются сальниковые уплотнительные элементы из маслостойкой вакуумной резины или фторопласта, а для сверхвысокого вакуума — гибкие элементы (сильфоны диафрагмы). Также может использоваться передача движения через неподвижную перегородку.

Резина и сталь имеет большой коэффициент трения, и резиновые уплотнители подвижных соединений всегда нуждаются в смазке. Фторопласт может работать без смазки, но его износ во время работы должен компенсироваться установкой упругих дополнительных элементов.

Уплотнения для ввода поступательного движения в высокий и сверхвысокий вакуум изготавливаются полностью из металла и могут быть прогреты с целью обезгаживания до температуры 400–500°C.

Магнитные вводы движения через неподвижную перегородку из немагнитного материала обладают максимальной герметичностью, т.к. в них отсутствуют подвижные вакуумные уплотнения. Их недостатками является трение в вакууме и ограниченная величина передаваемых усилий и кинематически нежёсткая передача.

Примеры наиболее широко применяемых сальниковых уплотнений приведены на рис. 5.11, 5.12. Такие уплотнения могут использоваться как для передачи вращения, так и передачи перемещения.

Так как фторопласт менее упруг, чем резина, и имеет значительную остаточную деформацию, для компенсации износа и обеспечения плотного контакта уплотняющей фторопластовой втулки 1 (рис. 5.12) с подвижным полированным валом 5 исполь-



зуются упругие свойства резиновых колец 2, предварительно деформированных с помощью нажимной гайки 4 и втулки 3.

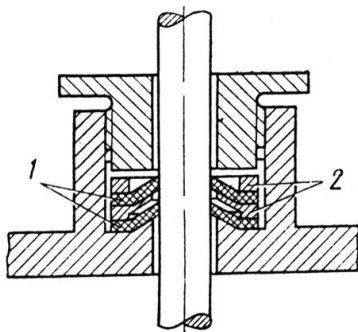


Рис. 5.11. Сальниковые уплотнение типа Вильсона для передачи вращательного движения в вакууме:

- 1 — прокладки из резины или фторопласта;
- 2 — металлические шайбы

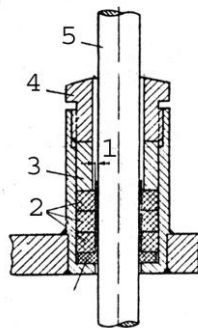


Рис. 5.12. Устройства для ввода вращения с использованием фторопластовой втулки:

- 1 — фторопластовая втулка;
- 2 — резиновые кольца;
- 3 — втулка;
- 4 — нажимная гайка;
- 5 — полированный вал

Схема конструкций вводов поступательного движения с металлическим сифоном и постоянным магнитом приведены на рис. 5.13а, б.

Величина перемещения в устройстве 5.13а ограничена только количеством гофров и эластичностью сиффона.

Схемы вводов качательного движения в вакууме, показаны на рис. 5.14. Они имеют угол качания  $\alpha$  в мембранных вводах не более  $10^\circ$ , а в сифонных —  $30^\circ$ . Для получения больших углов качания необходимы ускорительные передачи или вводы вращательного движения. Возможно применение поступательных вводов с последующим преобразованием поступательного движения в качательное. Схемы некоторых конструкций вводов вращения представлены на рис. 5.15.

Вводы вращения с пространственным шарниром и планетарной зубчатой передачей применяются для передачи значительных крутящих моментов.

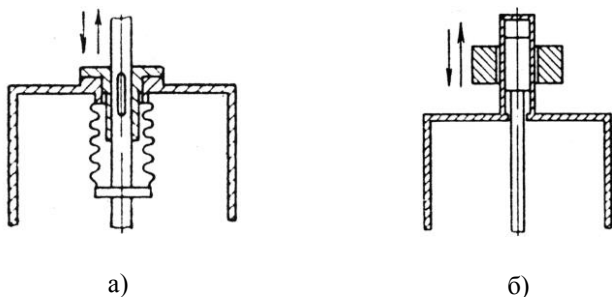


Рис. 5.13. Схема вводов поступательного движения с металлическим сильфоном (а) и постоянным магнитом (б)

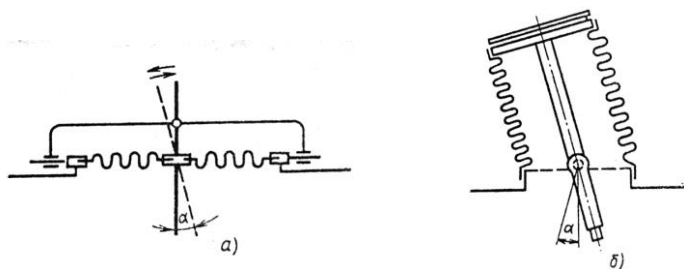


Рис. 5.14. Схемы вводов качательного движения в вакуум: а) мембраны; б) сильфоны

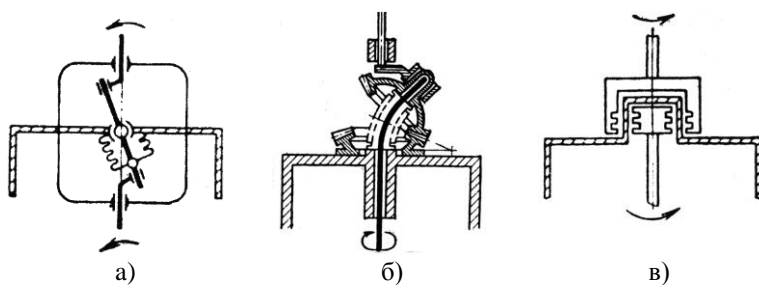


Рис.5.15. Схемы конструкций вводов вращения:  
а) с пространственным шарниром; б) с планетарной зубчатой передачей;  
в) с постоянным магнитом

Магнитный ввод-вращение в вакуум применяется в высоковакуумных системах для передачи вращательного движения с большой частотой вращения и малым крутящим моментом. Он может быть сделан прогреваемым, но не обеспечивает кинематической жёсткости передачи.

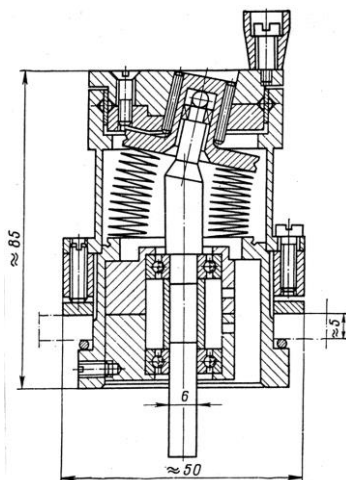


Рис. 5.16. Устройство для передачи вращательного движения с использованием сильфонного уплотнения

В экспериментальных вакуумных установках в основном применяются вводы-вращения пример, которого представлен на рис. 5.16. Они имеют средние показатели по передаваемым крутящим моментам и скоростям вращения.

## 5.5. Коммутационная аппаратура

Коммутационная аппаратура (раны, вентили, затворы, клапаны, натекатели) — обязательный элемент любой вакуумной системы. Этот элемент в закрытом состоянии должен быть герметичным, а в открытом состоянии обладать, возможно, большей проводимостью. В рамках данного учебного пособия нет возможности дать информацию обо всём спектре коммутирующих

устройств, поэтому мы ограничимся рассмотрением конструкций наиболее распространённых в нашей лаборатории.

В металлических вакуумных клапанах и затворах, работающих при комнатной температуре, используются резиновые и фторопластовые уплотнители (рис. 5.17а).

В прогреваемых конструкциях применяются герметизация за счёт пластической деформации материала одной из соприкасающихся поверхностей. Широко распространена конструкция с конусным уплотнительным элементом (рис. 5.17б), изготовленным из меди и алюминия. Недостатком этой конструкции является постепенное увеличение площади герметизирующих поверхностей, а следовательно, и усилия, необходимого для закрытия клапана. В конструкции, изображенной на рис. 5.17в уплотнительный элемент работает на срез, усилие герметизации не зависит от числа срабатываний, но возрастает ход запирающего элемента.

На рис. 5.18 изображён вентиль ДУ-25 с сильфонным уплотнением штока. Для удобства сборки привод вентиль с подвижным сильфонным уплотнением смонтирован на фланце 3 и представляет собой съёмный узел. Вентили с металлическим уплотнителем имеют аналогичную конструкцию, но из-за гораздо больших усилий герметизации они обладают существенно усиленной ходовой частью.

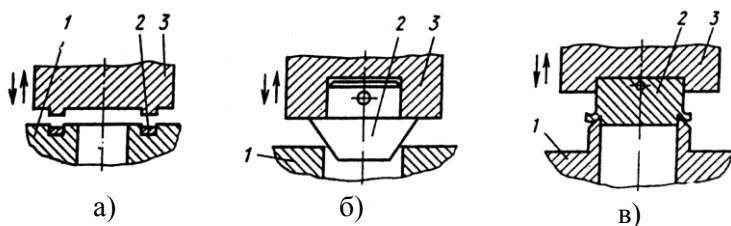


Рис. 5.17. Уплотнительный элемент вакуумных затворов:

1 — седло; 2 — уплотнитель; 3 — герметизирующий элемент

Ресурс клапанов с эластомерным уплотнением при регулярной смазке узлов трения составляет более 100 тысяч циклов без замены деталей привода. Ресурс уплотнителя много меньше и зависит от удельной нагрузки, т.е. от величины сжатия, установ-

ленной в процессе изготовления и регулировки вентиля. Поскольку в процессе эксплуатации клапана предусматривается замена уплотнителя, его ресурс не определяет ресурс вентиля. В обычных условиях эксплуатации уплотнитель рекомендуется заменять не реже чем после 20–25 тысяч циклов срабатывания вентиля.

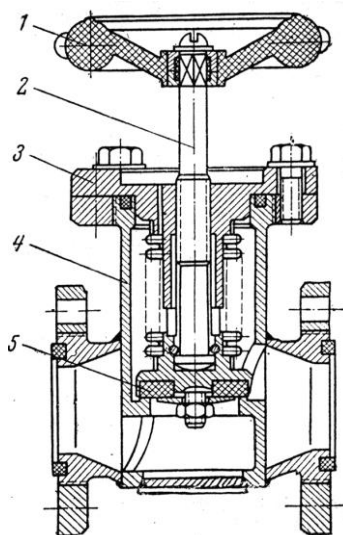


Рис. 5.18. Вакуумный вентиль с ручным приводом:

- 1 — маховик; 2 — винт; 3 — фланец;  
4 — корпус; 5 — резиновый уплотнитель

Медный уплотнительный конус вентиля с диаметром условного прохода 25 мм, работающий при оптимальной нагрузке (около 25–30 кг на миллиметр длины контакта конуса с седлом), способен выдержать без потери герметичности около 20 тысяч циклов срабатывания. По мере увеличения размера вентиля — диаметра условного прохода — ресурс конуса понижается.

При каждой разборке вентиля конус протачивают или заменяют. Это в первую очередь относится к вентилям с большим условным проходом — около 100 мм.

Ресурс вентиля с металлическим уплотнителем составляет до сотни тысяч циклов срабатывания. В процессе выработки ре-

сурса производится два-три ремонта вентиля с заменой или восстановлением отдельных его деталей.

Для управления газовым потоком и контролем за расходом газа, например, при измерении скорости откачки, применяются краны с регулируемой проводимостью. В вакуумной технике обычно используются регуляторы с регулирующим органом в виде тонкой конической иглы, вводимой в канал соответствующей формы вплоть до полного перекрытия (рис. 5.19).

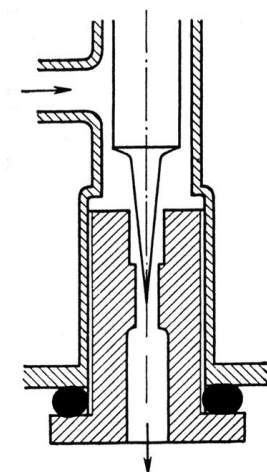


Рис. 5.19. Принцип устройства игольчатого регулятора

Ход иглы может изменяться непрерывно с помощью микрометрического винта. В узле управления перемещением иглы применяются соответствующие уплотнения, а пространство высокого вакуума герметизируется сильфоном (из металла или тефлона).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. — М.: Наука, 1965.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. — М.: Наука, 1964.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. — М.: Наука, 1979.
4. Дешман С. Научные основы вакуумной техники. — М.: Мир, 1963.
5. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенченко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. — М.: Энергия, 1970.
6. Глазков А.А., Милованова Р.А. Учебная лаборатория вакуумной техники. — М.: Атомиздат, 1971.
7. Грошковский Я. Техника высокого вакуума. — М.: Мир, 1975.
8. Васильев Г.А. Магниторазрядные насосы. — М.: Мир, 1970.
9. Кузнецов В.И., Немилов Н.Ф., Шемякин В.Е. Эксплуатация вакуумного оборудования. — М.: Энергия, 1978.
10. Розанов Л.Н. Вакуумная техника — М.: Высшая школа, 1990.
11. Каменецкий И.Я., Санчурский Г.М. Заварка электровакуумных приборов. — М.: Высшая школа, 1973.