

А. И. ПИПКО, В. Я. ПЛИСКОВСКИЙ, Е. А. ПЕНЧКО

Конструирование и расчет вакуумных систем

Третье издание, переработанное и
дополненное

МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1979 г.



ББК 31.77
П 32
УДК 621.521

Пипко А. И. и др.

П 32 Конструирование и расчет вакуумных систем/
Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. —
3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1979. —
504 с., ил.

В пер.: 1 р. 70 к.

В книге освещены вопросы расчета и конструирования современных вакуумных систем и их элементов. Подробно описаны средства откачки, методы измерения полного и парциального давлений и газовых потоков. По сравнению со вторым изданием приведено большое количество справочного материала, необходимого для расчета и конструирования вакуумных систем. Второе издание книги вышло в 1970 г.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников, занятых конструированием, эксплуатацией вакуумных установок, и может служить дополнительным пособием для студентов высших учебных заведений.

П 30407-061
051(01)-79 218-79 2307000000

ББК 31.77
6П5.7

АНАТОЛИЙ ИСААКОВИЧ ПИПКО
ВЛАДИМИР ЯКОВЛЕВИЧ ПЛИСКОВСКИЙ
ЕВГЕНИЙ АНУФРИЕВИЧ ПЕНЧКО

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Редактор С. И. Гоникберг
Редактор издательства А. А. Цитленко
Переплет художника В. Н. Хомякова
Технический редактор Н. П. Собакина
Корректор З. Б. Драновская
ИБ № 654

Сдано в набор 28.07.78 **Подписано к печати 20.10.78** **Т-19916**
Формат 84×108¹/₃₂ **Бумага типографская № 1** **Гарн. шрифта литературная**
Печать высокая **Усл. печ. л. 23,46** **Уч.-изд. л. 26,87**
Тираж 6900 экз. **Заказ 778** **Цена 1 р. 70 к.**

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном
комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,
113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

© Издательство «Энергия», 1979.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

Развитие электроники, радиоэлектронной аппаратуры, производство чистых и сверхчистых материалов тесно связаны с успехами вакуумной техники.

Рассмотрение в одной книге всех разделов вакуумной техники не представляется возможным, ввиду чего авторы ограничились изложением главным образом вопросов, связанных с расчетом и конструированием вакуумных систем.

Третье издание книги значительно переработано и дополнено новым материалом.

Существенно пересмотрены главы, посвященные расчетам вакуумных систем и их элементов. Для облегчения понимания методики вакуумных расчетов расширены главы, в которых даны сведения по физике разреженных газов, элементам кинетической теории, явлениям на поверхности раздела «газ — твердое тело».

Значительно дополнены и переработаны главы, в которых описываются элементы вакуумных систем (коммутационная и контрольно-измерительная аппаратура, вводы движения, вакуумные насосы для безмасляной откачки). Особое внимание уделено устройствам для измерения потока разреженного газа, которые стали необходимой принадлежностью вакуумных систем современного технологического оборудования.

Части первая, вторая и гл. 9—13, 17 написаны совместно канд. техн. наук, доц. А. И. Пипко и канд. техн. наук В. Я. Плисковским, гл. 14—16—Е. А. Пенчко.

В связи с отсутствием современного учебника по вакуумной технике книга может служить пособием для студентов высших учебных заведений.

Авторы приносят искреннюю благодарность научному редактору канд. техн. наук С. И. Гоникбергу за помощь при подготовке книги к изданию.

Авторы

Часть первая

Теоретические основы вакуумной техники

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

В вакуумной технике, как правило, имеют дело с парами и газами, находящимися при давлениях много меньше атмосферного.

В указанной области давлений основные закономерности течения газов базируются на кинетической теории, основу которой составляет представление о газе как о совокупности молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении и взаимодействующих между собой и с ограничивающими рассматриваемый объем стенками только механически; при этом столкновения принимаются упругими. Средняя энергия хаотического движения молекул пропорциональна температуре газа. Обычно учитывается лишь энергия поступательного движения молекул, и поэтому рост температуры соответствует увеличению их кинетической энергии.

Основные зависимости кинетической теории газов выводятся с помощью теорем теории вероятности и статистических методов применительно к идеальным газам.

Идеальными принято считать такие газы, у которых:

молекулы можно представить как упругие материальные частицы;

силы межмолекулярного взаимодействия отсутствуют (происходят лишь упругие столкновения между молекулами);

объем, занимаемый собственно молекулами, исчезающе мал по сравнению с объемом, свободным от молекул.

При давлениях меньше атмосферного модельный «идеальный газ» достаточно точно описывает поведение реального газа.

1-1. ДАВЛЕНИЕ И ПЛОТНОСТЬ ГАЗА

Давление газа в кинетической теории представляется результатом ударов находящихся в тепловом движении молекул о стенку сосуда, содержащего газ. Поэтому для подсчета давления необходимо найти сначала число молекул, падающих в единицу времени на единицу площади поверхности стенки, ограничивающей объем, а затем определить изменение импульса движения при соударении молекул со стенкой. Сумма изменений импульсов движения всех молекул, падающих на стенку, и даст давление газа.

С целью определения числа молекул, падающих на единицу площади поверхности стенки, выделим произвольно ориентирован-

ную элементарную площадку dA (рис. 1-1), на которую падает часть молекул, находящихся внутри полусферы и движущихся в направлении выделенной площадки.

Для простоты будем считать, что все молекулы газа движутся с одинаковой скоростью u . За единицу времени достигнут выделенной площадки dA молекулы, находящиеся от нее на расстоянии не более u .

Из объема газа dV в направлении площадки dA полетит часть молекул газа, пропорциональная отношению $d\psi/4\pi$, где $d\psi$ — телесный угол, под которым из центра выделенного объема видна рассматриваемая площадка, причем

$$d\psi = \frac{dA \cos \theta}{r^2}, \quad (1-1)$$

где θ — угол между нормалью к площадке и прямой, соединяющей центры выделенного объема и площадки.

Таким образом, в направлении выделенной площадки полетит из объема dV следующее число молекул:

$$dN_u = N_1 dV \frac{d\psi}{4\pi}, \quad (1-2)$$

где N_1 — число молекул в единице объема.

Объединим (1-1) и (1-2) и получим:

$$dN = N_1 \cos \theta \frac{dV dA}{4\pi r^2}. \quad (1-3)$$

В выражении (1-3), как мы видим, количество молекул, попадающих из объема dV на площадку dA , находящегося под углом θ относительно нормали к площадке dA , пропорционально косинусу этого угла. Это и есть выражение так называемого *закона косинуса*.

Выделенный объем dV равен:

$$dV = r \sin \theta dr d\theta d\varphi, \quad (1-4)$$

и выражение (1-3) преобразуется следующим образом:

$$dN = N_1 \frac{dA}{4\pi} \cos \theta \sin \theta dr d\varphi d\theta. \quad (1-5)$$

Так как до выделенной площадки за единицу времени долетят лишь те молекулы газа, которые находятся на расстоянии не более u , то

$$dN_{dA, u} = N_1 u \frac{dA}{4\pi} \cos \theta \sin \theta d\varphi d\theta. \quad (1-6)$$

Интегрируя выражение (1-6) по поверхности сферы, т. е. по φ от 0 до 2π и по θ — от 0 до $\pi/2$, получаем:

$$N_{dA, u} = \frac{N_1 u dA}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \frac{N_1 u dA}{4}. \quad (1-7)$$

Число молекул, попадающих в единицу времени на единицу площади, равно:

$$N_u = \frac{N_1 u}{4}; \quad (1-8)$$

где u — средняя арифметическая скорость u_a [см. (1-23)].

При соударении молекул, имеющих массу m , со стенкой изменяет свое направление на противоположное только нормальная к стенке составляющая скорости, и, таким образом, количество движения изменяется на величину $2mu \cos \theta$.

Давление будет получено, если проинтегрировать произведение $2mu \cos \theta$ на выражение (1-6), отнесенное к единице площади поверхности по φ в пределах от 0 до 2π и по θ — от 0 до $\pi/2$:

$$p = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} 2mu \cos \theta N_1 u \frac{1}{4\pi} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \frac{1}{3} N_1 m u^2, \quad (1-9)$$

где u — средняя квадратичная скорость молекул газа \bar{u} [см. (1-24)].

Плотность среды ρ — это отношение массы газа M_r к занимаемому им объему V , т. е. при равномерном распределении массы по объему:

$$\rho = \frac{M_r}{V}. \quad (1-10)$$

Учитывая, что

$$N_1 m = \rho, \quad (1-11)$$

получаем:

$$p = \frac{1}{3} \rho u^2. \quad (1-12)$$

1-2. ЗАКОН БОЙЛЯ—МАРИОТТА

Из уравнения (1-12) следует, что при постоянной температуре газа

$$\frac{p}{\rho} = \frac{1}{3} u^2 = \text{const.} \quad (1-13)$$

Так как $1/\rho$ называется *удельным объемом* $V_{уд}$, то с учетом этого уравнение (1-13) можно записать:

$$p V_{уд} = \text{const.} \quad (1-14)$$

При смешении химически не взаимодействующих газов, имеющих одинаковую температуру, температура смеси останется той же,

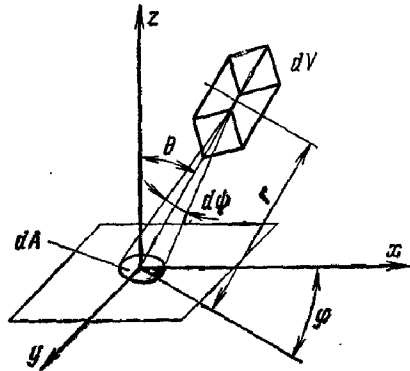


Рис. 1-1. К определению числа молекул, попадающих на единицу площади.

что имели ее компоненты, и, следовательно, при одной и той же температуре средняя кинетическая энергия молекул должна быть одинакова для всех газов.

Из (1-9) следует:

$$pV = \frac{2}{3} \frac{mu^2}{2} N, \quad (1-15)$$

где $N = N_1 V$.

1-3. ЗАКОН АВОГАДРО

Из уравнения (1-15) следует, что при равных температурах и давлениях равные объемы газов V должны содержать одинаковое количество молекул N . Этот вывод называется *законом Авогадро*.

На основании закона Авогадро молекулярная масса M любого газа или пара определяется как выраженная в килограммах масса такого количества газа, которое при 273 К и давлении $1,02 \cdot 10^5$ Па занимает объем 22,41 м³. Эта масса газа называется *килограмм-молекулой*. Довольно часто при расчетах используется в тысячу раз меньшая величина, называемая *молем* и представляющая собой массу молекул газа, выраженную в граммах, которая при тех же условиях (273 К; $1,02 \cdot 10^5$ Па) занимает объем $V_0 = 22,41$ л.

Один моль газа содержит:

$$N_A = 6,0228 \cdot 10^{23} \text{ молекул,}$$

N_A называется числом Авогадро.

Довольно часто приходится оперировать числом молекул, содержащихся в 1 см³ при 273 К и $1,02 \cdot 10^5$ Па, которое называется числом *Лосмидта*

$$N_L = 2,687 \cdot 10^{19} \text{ молекул/см}^3.$$

1-4. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Поскольку средняя кинетическая энергия является мерой температуры газа, то на основании (1-15) можно записать:

$$pV = kTN, \quad (1-16)$$

где k — коэффициент пропорциональности, характеризующий энергию одной молекулы газа и называемый *постоянной Больцмана*:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

Для одного моля газа уравнение (1-16) примет вид:

$$pV_0 = kTN_A = R_0 T, \quad (1-17)$$

где $R_0 = kN_A$ — *универсальная газовая постоянная*, одинаковая для всех газов:

$$R_0 = 1,986 \text{ кал/(К·моль)} = 8,314 \cdot 10^3 \text{ Дж/(К·моль)} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ эВ.}$$

В общем виде уравнение (1-17), называемое *уравнением состояния идеального газа*, записывается следующим образом:

$$pV = n_m R_0 T, \quad (1-18)$$

где n_m — число молей газа в объеме V .

Из уравнений (1-10) и (1-16) следует:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{k}{m} T, \quad (1-19)$$

т. е. давление газа при неизменном объеме пропорционально температуре.

1-5. СКОРОСТЬ ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

При стационарном состоянии, когда газ находится при температуре стенок сосуда, устанавливается определенное распределение скоростей между отдельными молекулами.

Первоначально закон распределения скоростей был установлен Максвеллом и Больцманом.

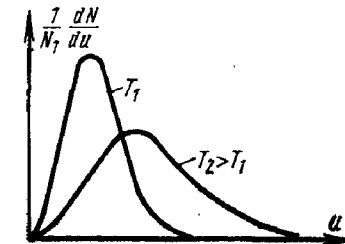


Рис. 1-2. Распределение молекул газа по скоростям $\frac{1}{N_1} \frac{dN}{du}$ — концентрация молекул с данной скоростью u .

Для произвольного направления скорости функция распределения имеет вид:

$$\frac{1}{N_1} \frac{dN}{du} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} u^2 e^{-\frac{mu^2}{2kT}}, \quad (1-20)$$

где N_1 — число молекул в единице объема; u — произвольно направленная скорость; dN — количество молекул в единице объема, скорость которых лежит в интервале от u до $u+du$.

Перепишем (1-20) в несколько иной форме:

$$dN_u = 2N_1 \sqrt{\frac{m^3}{2\pi k^3 T^3}} e^{-\frac{mu^2}{2kT}} u^2 du. \quad (1-21)$$

Дифференцируя функцию (1-21) по u , можно установить, что эта функция имеет максимум при

$$u_v = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2R_0 T}{M}} = 128,95 \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м/с,} \quad (1-22)$$

где M — масса газа, численно равная его молекулярной массе; u_v — наиболее вероятная скорость.

Графики, иллюстрирующие закон распределения Максвелла — Больцмана, показаны на рис. 1-2.

Средняя арифметическая скорость равна сумме скоростей всех молекул, находящихся в единичном объеме, деленной на число молекул в единице объема:

$$u_a = \frac{1}{N_1} \int_0^{\infty} u dN,$$

и, используя (1-21), получим:

$$u_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8R_0T}{\pi M}} = 145,51 \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м/с.} \quad (1-23)$$

Средняя квадратичная скорость равна сумме квадратов скоростей всех молекул, находящихся в единичном объеме, деленной на число молекул в единице объема:

$$\bar{u}^2 = \frac{1}{N_1} \int_0^{\infty} u^2 dN,$$

откуда получим

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3R_0T}{M}} = 157,94 \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м/с.} \quad (1-24)$$

В дальнейшем мы будем обычно пользоваться средней арифметической скоростью и лишь при расчете кинетической энергии — средней квадратичной скоростью.

1-6. СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПУТИ

Несмотря на сравнительно большие скорости движения, отдельные молекулы из-за взаимных столкновений обычно перемещаются на сравнительно малые расстояния, при этом за счет этих столкновений молекулы меняют направление своего движения. Подсчет числа столкновений молекул в единице объема производится в предположении, что молекулы имеют форму шара с диаметром σ , упруго взаимодействуют друг с другом и скорости молекул распределены в соответствии с (1-21).

Подсчет числа всех столкновений молекул, движущихся с разными скоростями по всем возможным направлениям, приводит к выражению

$$z = 2N^2_1 \sigma^2 \sqrt{\frac{\pi kT}{m}}, \quad (1-25)$$

где z — число столкновений молекул между собой в единице объема за единицу времени; N_1 — число молекул в единице объема; σ — диаметр молекулы; k — постоянная Больцмана; m — масса молекулы; T — температура, К.

С учетом (1-23) можно записать выражение (1-25) так:

$$z = \frac{\pi}{\sqrt{2}} N^2_1 \sigma^2 u_a. \quad (1-26)$$

Каждому столкновению молекул газа соответствуют два свободных пути, так как в столкновении участвуют две молекулы. Одна молекула в единицу времени, таким образом, испытывает число столкновений, равное.

$$z_1 = \pi \sqrt{2} N_1 \sigma^2 u_a. \quad (1-27)$$

Так как в единицу времени молекула в среднем проходит путь, равный u_a , то средняя длина пути между столкновениями λ , называемая *средней длиной свободного пути*, равна:

$$\lambda = \frac{u_a}{z_1} = \frac{1}{\pi \sqrt{2} N_1 \sigma^2}. \quad (1-28)$$

Из выражения (1-16) следует:

$$N_1 = \frac{p}{kT}. \quad (1-29)$$

С учетом этого, преобразуя (1-28), получаем:

$$\lambda = \frac{kT}{\pi \sqrt{2} p \sigma^2}. \quad (1-30)$$

Таким образом, при постоянной температуре для определенного газа произведение

$$p\lambda = \text{const.} \quad (1-31)$$

Как уже отмечалось, формулы (1-28) и (1-30) получены в предположении, что молекулы сталкиваются как упругие шары, но если учесть силы взаимодействия между молекулами и связанное с этим искривление траекторий, то необходимо ввести поправку в виде дополнительного множителя. Это поправка введена Сезерлендом и имеет вид:

$$\lambda_T = \frac{\lambda_{\infty}}{1 + \frac{C}{T}}, \quad (1-32)$$

где λ_T — средняя длина свободного пути при температуре T ; λ_{∞} — средняя длина свободного пути при бесконечно большой температуре; C — постоянная Сезерленда.

Окончательно получим:

$$\lambda = \frac{1}{\pi \sqrt{2} N_1 \sigma^2_{\infty} \left(1 + \frac{C}{T}\right)} = \frac{kT}{\pi \sqrt{2} p \sigma^2_{\infty} \left(1 + \frac{C}{T}\right)}, \quad (1-33)$$

где σ_{∞} — диаметр молекулы при бесконечно большой температуре.

Анализ уравнения (1-33) показывает, что с увеличением температуры средняя длина свободного пути увеличивается. При уменьшении температуры от очень большого значения до $T=C$ значение λ увеличивается в 2 раза, в связи с чем это значение температуры называется «температурой удваивания». Значения постоянной C , найденные экспериментально, приведены в табл. 1-1.

Таблица 1-1

Значение температуры удваивания (постоянной Сезерленда) для различных газов

Газ	He	Ne	H ₂	CO	N ₂	O ₂	Ar	Kr	Xe	CO ₂	Воздух
T, K	80	56	84,4	100	104	125	142	188	252	254	112

Для смеси двух газов выражение (1-25) должно быть заменено следующим:

$$z_{1,2} = 2N_{1-1}N_{1-2}\sigma_{1,2}^2 \sqrt{\frac{2\pi kT}{m_{1,2}}}, \quad (1-34)$$

где N_{1-1} , N_{1-2} — число молекул первого и второго компонентов соответственно в единице объема; $\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$ — газокинетический

диаметр молекул смеси газов; $m_{1,2} = \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)}$ — приведенная масса молекул смеси газов.

Средняя длина свободного пути молекулы первого компонента будет равна:

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{\pi N_{1-1} \sigma_1^2 \sqrt{2} + \pi N_{1-2} \sigma_{1,2}^2 \sqrt{1 + \frac{m_1}{m_2}}}. \quad (1-35)$$

Формула (1-35) может содержать значения диаметров молекул при бесконечной температуре σ_∞ и множители с постоянной Сезерленда, но такая запись усложняет выражение и обычно не используется.

При желании определить средний свободный путь молекулы второго компонента надо в формуле (1-35) соответствующим образом заменить индексы.

Если концентрация первого компонента невелика, то вместо формулы (1-35) можно пользоваться следующей упрощенной формулой:

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{\pi N_{1-2} \sigma_{1,2}^2 \sqrt{1 + \frac{m_1}{m_2}}} = \frac{4kT}{\pi (\sigma_1 + \sigma_2)^2 p_2 \sqrt{1 + \frac{m_1}{m_2}}}. \quad (1-36)$$

1-7. ОБЪЕМ ГАЗА, ЗАНИМАЕМЫЙ МОЛЕКУЛАМИ, УДАРЯЮЩИМИСЯ О ПОВЕРХНОСТЬ СТЕНКИ

Для определения объема газа, занимаемого молекулами, ударяющимися в единицу поверхности в единицу времени, надо выражение (1-8) разделить на число молекул в единице объема N_1 и подставить значение u_a из уравнения (1-23):

$$V_1 = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{8R_0T}{\pi M}} = 36,38 \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (1-37)$$

Объем газа, ударяющийся в единицу времени о поверхность площадью A , м², равен:

$$V_A = 36,38A \sqrt{T/M}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1-38)$$

и, таким образом, не зависит от давления.

1-8. ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В ГАЗАХ

Внутреннее трение в газах наряду с явлениями диффузии и теплопроводности относится к явлениям переноса в разреженных газах. Все три упомянутых явления имеют близкую физическую природу и описываются сходными математическими выражениями.

Явления переноса возникают в случае неоднородного распределения по объему газа температуры (кинетической энергии), количества движения или концентрации смеси. Движущиеся молекулы газа переносят рассматриваемую величину из одной части объема газа в другую, способствуя выравниванию ее распределения.

Явление внутреннего трения заключается во взаимодействии слоев текущего газа. При этом, как показывает опыт, сила взаимодействия слоев текущего газа пропорциональна градиенту скорости. Эта сила, направленная параллельно потоку, стремится уменьшить скорость более быстро движущегося слоя и увеличить скорость более медленно движущегося слоя. Подобное явление называется *внутренним трением*, или *вязкостью газа*. Вязкость зависит от рода текущего газа, что учитывается введением коэффициента вязкости η .

Таким образом, сила внутреннего трения (рис. 1-3), препятствующая перемещению слоев газа друг относительно друга на выделенной площади A , будет:

$$F = \eta A \frac{du_{\text{газ}}}{dz}, \quad (1-39)$$

где F — сила трения; η — коэффициент вязкости, представляющий собой тангенциальную силу, действующую на единицу площади

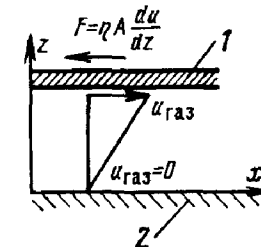


Рис. 1-3. Внутреннее трение при ламинарном режиме течения газа.

1 — движущаяся пластина; 2 — неподвижная пластина.

внутри газа, когда уменьшение скорости с расстоянием равно единице (градиент скорости равен единице); $\frac{du_{\text{газ}}}{dz}$ — градиент скорости движения газа.

Вместе с тем сила трения F измеряется скоростью переноса количества движения через площадку, разделяющую взаимодействующие между собой слои газа.

Количество молекул, пересекающих в единицу времени площадку dA под углом θ , в соответствии с уравнением (1-6) равно:

$$dN_{u, \theta} = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} N_1 u \frac{dA}{4\pi} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \frac{1}{2} N_1 u \cos \theta \sin \theta d\theta dA. \quad (1-40)$$

Каждая молекула, пересекающая площадку dA , обладает определенным количеством движения, однако достигнут площадки dA без столкновения лишь те молекулы, которые находятся от нее на расстоянии длины свободного пути λ . Градиент тангенциальной скорости пропорционален расстоянию до рассматриваемой плоскости, отсчитываемому по нормали, т. е. величине $\lambda \cos \theta$.

Суммарная величина переносимого молекулами количества движения будет:

$$\begin{aligned} dF_{\perp} &= \frac{1}{2} N_1 u_a \cos \theta \sin \theta d\theta dA \lambda \cos \theta \frac{d(mu)_{\text{газ}}}{dz} = \\ &= \frac{1}{2} N_1 m u_a \cos^2 \theta \sin \theta d\theta dA \lambda \frac{du_{\text{газ}}}{dz}, \end{aligned} \quad (1-41)$$

где $\frac{d(mu)_{\text{газ}}}{dz}$ — градиент количества движения в направлении нормали к скорости течения газа.

Для того чтобы определить количество движения, переносимое молекулами, падающими под разными углами, надо проинтегрировать (1-41) по θ в пределах от 0 до $\pi/2$ (количество движения, переносимое сверху вниз) и от $\pi/2$ до π (количество движения, переносимое снизу вверх) и просуммировать результаты:

$$F_{0-\pi/2} = \int_0^{\pi/2} \frac{1}{2} N_1 m u_a \cos^2 \theta \sin \theta d\theta dA \lambda \frac{du_{\text{газ}}}{dz} = \frac{1}{6} N_1 m u_a \lambda dA \frac{du_{\text{газ}}}{dz}. \quad (1-42)$$

Второй интеграл имеет ту же величину, и, таким образом,

$$dF_{\Sigma} = \frac{1}{3} N_1 m u_a \lambda dA \frac{du_{\text{газ}}}{dz}, \quad (1-43)$$

и для площадки A

$$F = \frac{1}{3} N_1 m u_a \lambda A \frac{du_{\text{газ}}}{dz}. \quad (1-44)$$

Сравнивая (1-39) и (1-44), находим, что коэффициент внутреннего трения будет равен:

$$\eta = \frac{1}{3} N_1 m u_a \lambda = \frac{1}{3} \rho u_a \lambda. \quad (1-45)$$

Более точные расчеты [24] дают несколько иное соотношение

$$\eta = 0,499 \rho u_a \lambda, \quad (1-46)$$

которое используется во всех последующих расчетах.

Из формул (1-45) и (1-28) следует, что коэффициент внутреннего трения η не зависит от плотности газа и возрастает с увеличением температуры. Характерно, что для жидкостей коэффициент вязкости с ростом температуры уменьшается.

Следует указать, что выражения (1-45) и (1-46) действительны для давлений, при которых еще не сказываются силы межмолекулярного притяжения.

Уравнение (1-46) может быть применено только при условии, что длина свободного пути молекул много меньше размеров объема, в который заключен газ.

Размерность коэффициента внутреннего трения или коэффициента вязкости Па·с.

Зависимость коэффициента вязкости от температуры обычно описывается формулой

$$\eta = \frac{\text{const} \sqrt{T}}{1 + \frac{C}{T}}, \quad (1-47)$$

где $\text{const} = (5/16 \sigma_{\infty}^2) \sqrt{\frac{km}{\pi}}$; σ_{∞} — диаметр молекулы при бесконечно большой температуре; k — постоянная Больцмана; C — постоянная Сезерленда; m — масса молекулы; T — температура, К.

1-9. ДИФФУЗИЯ ГАЗОВ

Диффузия газов заключается в постепенном проникновении одного газа в другой. Диффузия наблюдается только при различной концентрации газа в разных частях объема.

Как уже отмечено в § 1-8, явление диффузии сходно с явлением внутреннего трения, разница заключается лишь в том, что в случае диффузии осуществляется перенос массы газа; соответственно сходны и математические выражения, описывающие эти явления. Поэтому воспользуемся выражениями (1-39) и (1-44), преобразовав их. В результате получаем:

$$M' = DA \frac{dp}{dz}, \quad (1-48)$$

где M' — масса газа, проходящая в направлении z в единицу времени, массовый поток газа; D — коэффициент пропорциональности, численно равный массе газа, проходящей в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению потока газа при условии, что плотность газа меняется на единицу при пе-

ремещении на единицу длины; A — площадь поверхности, через которую проходит газ; $d\rho/dz$ — градиент плотности газа вдоль оси z :

$$M' = \frac{1}{3} u_a \lambda A d\rho/dz, \quad (1-49)$$

где u_a — средняя скорость молекул; λ — средняя длина свободного пути молекул; N_1 — число молекул в единице объема.

Сравнивая (1-48) и (1-49), получаем:

$$D = \frac{1}{3} u_a \lambda. \quad (1-50)$$

Сопоставив (1-45) и (1-50), имеем:

$$D = \frac{\eta}{\rho}. \quad (1-51)$$

Рассматривая диффузию одного газа в другой, примем, что λ_1 и u_{a1} — средняя длина свободного пути и средняя скорость молекул первого газа и соответственно λ_2 и u_{a2} — эти же величины для второго газа, причем λ_1 и λ_2 можно определить по уравнению (1-35). Считаем также, что оба газа находятся при одинаковой температуре.

Пусть концентрация первого газа убывает в направлении оси z , а второго — возрастает. Обозначим число молекул первого газа в единице объема c_1 и второго — c_2 . Тогда

$$N_{1-1} = c_1 N_L \quad \text{и} \quad N_{1-2} = c_2 N_L,$$

где N_{1-1} и N_{1-2} — число молекул первого и второго газа в единице объема соответственно; N_L — число Лошмидта.

Согласно закону Авогадро общее число молекул газа в единице объема независимо от его расположения в пространстве должно быть одно и то же:

$$N_{1-1} + N_{1-2} = N_1 = \text{const}$$

или

$$c_1 N_L + c_2 N_L = \text{const.}$$

Следовательно,

$$c_1 + c_2 = \text{const.}$$

В результате находим, что

$$\frac{dc_1}{dz} = -\frac{dc_2}{dz}, \quad (1-52)$$

т. е. градиенты концентрации газов равны по абсолютной величине, но имеют противоположные знаки. Вычисления, аналогичные проведенным выше, позволяют определить число молекул первого газа, проходящих в направлении z в единицу времени, и также число молекул второго газа, проходящих во встречном направлении.

Вычисления дают следующие значения коэффициентов диффузии:

$$D_{1-2} = D_{2-1} = \frac{1}{3} \frac{c_1 u_{a2} \lambda_2 + c_2 u_{a1} \lambda_1}{c_1 + c_2}. \quad (1-53)$$

Учитывая (1-50), выражение (1-53) можно преобразовать к виду

$$D_{1-2} = D_{2-1} = \frac{c_1 D_2 + c_2 D_1}{c_1 + c_2}, \quad (1-54)$$

где D_1 и D_2 — коэффициенты самодиффузии первого и второго газов.

Как показал Максвелл, при вычислении $D_{1-2} = D_{2-1}$ в формулу (1-53) следует подставлять значения $\lambda_1 = \lambda_{1,2}$ и $\lambda_2 = \lambda_{2,1}$, найденные по формуле (1-36) с учетом того, что N_{1-1} и N_{1-2} , которые входят в формулу (1-36), равны соответственно $N_{1-1} = c_1 N_L$ и $N_{1-2} = c_2 N_L$.

После преобразований получаем:

$$D_{1-2} = \frac{2\sqrt{2kT}}{3\pi^{3/2}(N_{1-1} + N_{1-2})\sigma_{1,2}^2} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}}. \quad (1-55)$$

Таким образом, коэффициент диффузии теоретически не зависит от соотношения концентраций.

Введя в формулу (1-55) вместо N_1 давление p , получим следующее выражение:

$$D_{1-2} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \left(\frac{kT}{\pi}\right)^{3/2} \frac{1}{p\sigma_{1,2}^2} \sqrt{\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}}, \quad (1-56)$$

где $p = p_1 + p_2$ — суммарное давление обоих газов.

Формула (1-55) позволяет получить соотношение

$$D_{1-2} = \frac{V \sqrt{u_{a1}^2 + u_{a2}^2}}{3\pi(N_{1-1} + N_{1-2})\sigma_{1,2}^2},$$

которое согласно (1-28) для одинаковых молекул будет выглядеть следующим образом:

$$D_{1-1} = D = \frac{2}{3} u_a \lambda.$$

Если учесть выражение (1-46), то последнее соотношение дает:

$$D = 1,336 \frac{\eta}{\rho}, \quad (1-57)$$

что гораздо точнее (1-51) и очень близко к выражению, учитывающему распределение скоростей молекул в газе по закону Максвелла [24].

1-10. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ

Процесс теплопередачи в сплошной среде описывается законом Фурье, который для площадки A можно записать следующим образом:

$$Q'_T = \lambda_Q \left(\frac{dT}{dz}\right) A, \quad (1-58)$$

где \dot{Q}'_T — тепловой поток через площадку A ; λ_Q — коэффициент теплопроводности, представляющий собой количество тепла, которое проходит в единицу времени через единицу изотермической поверхности при градиенте температур, равном единице; dT/dz — градиент температуры.

Рассматривая явления теплопроводности с точки зрения кинетической теории, следует определить энергию, переносимую молекулами газа через выделенную в объеме плоскость.

На долю одной молекулы приходится энергия

$$E = \frac{C_V T + \text{const}}{N_A}, \quad (1-59)$$

где E — внутренняя энергия газа; N_A — число Авогадро; C_V — молярная теплоемкость газа при постоянном объеме; T — абсолютная температура; const — начальная энергия одного моля газа.

Уравнение, характеризующее теплопроводность, будет иметь вид, подобный уравнению (1-43), но с использованием E из (1-59):

$$\begin{aligned} \dot{Q}'_T &= \frac{1}{3} N_1 u_a \lambda A \frac{d}{dz} \left(\frac{C_V T + \text{const}}{N_A} \right) = \\ &= \frac{1}{3} N_1 u_a \lambda \frac{C_V}{N_A} A \frac{dT}{dz}. \end{aligned} \quad (1-60)$$

Сравнивая (1-58) с (1-60), приходим к выводу, что

$$\lambda_Q = \frac{1}{3} N_1 u_a \lambda \frac{C_V}{N_A}.$$

Если перейти от молярной теплоемкости при постоянном объеме к удельной теплоемкости при постоянном объеме, то получим:

$$\lambda_Q = \frac{1}{3} \rho u_a \lambda C_{V\text{уд}}, \quad (1-61)$$

так как

$$N_1 \frac{C_V}{N_A} = \rho C_{V\text{уд}},$$

где $C_{V\text{уд}}$ — удельная теплоемкость при постоянном объеме.

Удельная теплоемкость при постоянном объеме $C_{V\text{уд}}$ может быть найдена по формуле

$$C_{V\text{уд}} = \frac{3}{2} (1 + \beta) \frac{R_0}{M}, \quad (1-62)$$

где β — коэффициент, учитывающий энергию колебательного и вращательного движения молекул: для одноатомных газов $\beta=0$, для двухатомных газов $\beta=2/3$, для трехатомных газов $\beta=1$ и для многоатомных газов $\beta=5/3$.

Сравнение (1-45), (1-51) и (1-61) показывает, что

$$\lambda_Q = \eta C_{V\text{уд}} D \rho C_{V\text{уд}}. \quad (1-63)$$

Из экспериментов следует, что соотношение (1-63) надо заменить выражением

$$\lambda_Q = \xi \eta C_{V\text{уд}}, \quad (1-64)$$

где ξ — поправочный множитель, вычисляемый по формуле [24]

$$\xi = \frac{9\kappa - 5}{4}, \quad (1-65)$$

$$\text{где } \kappa = \frac{5 + 3\beta}{3(1 + \beta)}. \quad (1-66)$$

Коэффициент теплопроводности, так же как коэффициент вязкости, зависит от температуры. В табл. 1-2 приведены значения коэффициентов теплопроводности λ_Q и вязкости η_0 для некоторых газов [24].

Таблица 1-2

Коэффициенты теплопроводности λ_Q и вязкости η_0 для некоторых газов

Газ	$\lambda_Q \cdot 10^3$ Вт/(м·К)	$\eta_0 \cdot 10^6$ Па·с	κ	$C_{V\text{уд}}$, кДж/(кг·К)	κ
He	14,3	18,76	2,45	3,12	—
Ne	4,5—5,0	29,81	2,50	0,628	—
Ar	1,59	21,02	2,44	0,312	1,667
H ₂	17,2	8,50	2,0	10,3	1,408
Воздух	2,4	17,22	1,96	0,715	1,4034
O ₂	2,43	19,31	1,92	0,656	1,396
CO	2,24	16,35	1,81	0,744	1,404
CO ₂	1,43	13,74	1,64	0,639	1,302
N ₂ O	1,51	13,66	1,71	0,648	—
N ₂	—	—	—	—	1,405

Анализируя уравнение (1-60), приходим к выводу, что в области средних давлений теплопроводность не зависит от давления, так как произведение $M\lambda$ не зависит от давления. Некоторая зависимость λ_Q от температуры связана с увеличением $C_{V\text{уд}}$ с ростом температуры.

Необходимо указать, что количество перенесенной тепловой энергии, определенное по формулам (1-58) и (1-60), не учитывает перенос тепла за счет излучения и конвекции.

Конвективный теплообмен следует учитывать только при значительных размерах теплообменивающихся поверхностей и сравнительно высоких давлениях (больше 10^5 Па).

Для плоских параллельных поверхностей уравнение (1-58) принимает вид:

$$Q'_T = \frac{\lambda_Q}{r} (T_1 - T_2) A, \quad (1-67)$$

где Q'_T — тепловой поток; λ_Q — коэффициент теплопроводности; r — расстояние между теплообменивающимися поверхностями; A — площадь поверхности; T_1 и T_2 — температуры поверхностей.

Теплообмен между двумя коаксиальными цилиндрическими поверхностями за счет теплопроводности газовой прослойки рассчитывается по уравнению

$$Q'_T = \frac{2\pi\lambda_Q (T_1 - T_2)}{\ln \frac{d_2}{d_1}} r, \quad (1-68)$$

где r — высота цилиндрической газовой прослойки; d_1 и d_2 — диаметры внутренней и внешней поверхностей.

При расстояниях между теплообменивающимися поверхностями, соизмеримыми со средней длиной свободного пути λ , теплопроводность газа уменьшается с понижением давления. Для этой области давлений правую часть уравнения (1-58) следует умножить на коэффициент ε .

В соответствии с теорией температурного скачка Ленгмюра [17] рекомендуется следующее значение для коэффициента ε :

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{a'\lambda}{r}}, \quad (1-69)$$

где λ — средняя длина свободного пути молекул; r — расстояние между теплообменивающимися поверхностями:

$$a' = \frac{3,75}{\alpha_{ак}} \frac{1 + \frac{2}{5}\beta}{1 + \frac{3}{4}\beta}, \quad (1-70)$$

где β — коэффициент, учитывающий энергию колебательного и вращательного движения молекул, см. с. 18; $\alpha_{ак} = \frac{T'_{газ} - T_{ст}}{T_{ст} - T_{газ}}$ — коэффициент

аккомодации; $T_{ст}$ — температура стенки; $T_{газ}$ — температура газа; $T'_{газ}$ — температура, соответствующая средней энергии молекул, отраженных от стенки.

Для параллельных поверхностей значение коэффициента аккомодации $\alpha_{ак}$ рекомендуется рассчитывать по формуле [24]

$$\alpha_{ак} = \frac{\alpha_{1ак}\alpha_{2ак}}{(\alpha_{1ак} + \alpha_{2ак}) - \alpha_{1ак}\alpha_{2ак}}, \quad (1-71)$$

где $\alpha_{1ак}$ и $\alpha_{2ак}$ — коэффициенты аккомодации для каждой из поверхностей.

Для цилиндрических поверхностей при одинаковых коэффициентах аккомодации $\alpha_{1,2 ак} = \alpha_{1 ак} = \alpha_{2 ак}$

$$\alpha_{ак} = \frac{\alpha_{1,2 ак}}{1 - (1 - \alpha_{1,2 ак}) \frac{d_1}{d_2}}. \quad (1-72)$$

В принципе значение коэффициента аккомодации $\alpha_{ак}$ должно зависеть от соотношения молекулярных масс газа и вещества поверхности, однако на практике $\alpha_{ак}$ в большей степени зависит от качества обработки поверхности. Для шероховатых поверхностей можно считать $\alpha_{ак} = 1$.

Если средняя длина свободного пути молекул значительно больше расстояния между поверхностями, то λ_Q изменяется пропорционально плотности газа, что объясняет хорошие теплоизоляционные свойства газов при низких давлениях.

Этот вывод следует из рассмотрения (1-69), ибо при $\lambda \gg r$

$$\varepsilon = \frac{r}{a'\lambda}. \quad (1-73)$$

Отметим, что с учетом (1-73) выражение (1-67) запишется следующим образом:

$$Q'_T = \frac{\lambda_Q}{a'\lambda} (T_1 - T_2) A, \quad (1-74)$$

т. е. при молекулярном режиме течения газа теплообмен между поверхностями за счет теплопроводности среды не зависит от расстояния между поверхностями и прямо пропорционален давлению [см. (1-31)].

1-11. ТЕРМОМОЛЕКУЛЯРНОЕ ТЕЧЕНИЕ

Если имеются два сосуда, соединенные трубопроводом, находящиеся при разных температурах T_1 и T_2 , а диаметр трубопровода d гораздо меньше средней длины свободного пути $d \ll \lambda$, то в состоянии равновесия давления в этих сосудах окажутся разными. Эта разница связана с тем, что в соответствии с (1-8) и (1-23) при равновесном состоянии газа

$$\frac{N_{1-1}}{N_{1-2}} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}, \quad (1-75)$$

где N_{1-1} и N_{1-2} — количества молекул в единице объема в сосудах 1 и 2, находящихся соответственно при температурах T_1 и T_2 .

Учитывая выражение (1-16), имеем:

$$\frac{p_1}{p_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}, \quad (1-76)$$

где p_1 и p_2 — давления в сосудах 1 и 2.

При повышении давления в сосудах соотношение (1-76) не соблюдается, так как при диаметре трубопровода, гораздо большем средней длины свободного пути λ , давления в сосудах становятся

одинаковыми, и в соответствии с уравнением состояния (1-19) получаем:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (1-77)$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотности газов в сосудах 1 и 2.

Выражение (1-76) необходимо учитывать, в частности, при измерении давления в охлаждаемых или нагретых объемах.

Так, если измеряется давление газа в прогретом с целью обезгаживания до 873 К объеме электровакуумного прибора, а газ в объеме манометрического преобразователя находится при температуре 293 К, то фактическое давление в объеме электровакуумного прибора будет равно:

$$p_{\text{эвн}} = \sqrt{\frac{873}{293}} p_{\text{п}} = 1,73 p_{\text{п}},$$

где $p_{\text{п}}$ — измеренное манометрическим преобразователем давление.

Точные расчеты и измерения показывают, что соотношение давлений в объемах на самом деле подчиняется более сложным зависимостям, чем (1-76). Необходимо учитывать род газа, материал и размеры соединительного трубопровода, разность температур, однако эти выражения весьма сложны и их вряд ли целесообразно применять при практических расчетах. Явление термомолекулярного течения газа используется в так называемых accommodations вакуумных насосах [96].

ГЛАВА ВТОРАЯ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ОТКАЧКИ

2-1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрим вакуумную систему, изображенную на рис. 2-1, которая состоит из откачиваемого объема 1, манометрических преобразователей 2, крана 3, трубопровода 4 и насоса 5. До начала работы насоса давление во всей вакуумной системе одинаково. При работе насоса количество газа в вакуумной системе непрерывно уменьшается, а так как объем сосуда остается неизменным, происходит уменьшение давления в вакуумной системе. При этом давление $p_{\text{п}}$ на входе в насос становится ниже, чем давление p на выходе из откачиваемого объема. Таким образом создается разность давлений $p - p_{\text{п}}$, которая обусловлена наличием в системе трубопровода, крана и других элементов, оказывающих сопротивление прохождению потока газа.

Если полагать, что в вакуумной системе отсутствуют натекания и газыделение, то количество газа Q_i , про-

текающего в единицу времени, одинаково в любом сечении системы и может быть определено как произведение давления p_i в i -м сечении на объем газа S_i , проходящего через это же сечение в единицу времени:

$$Q'_i = p_i S_i = \text{const}. \quad (2-1)$$

Это количество газа принято называть *поток*ом газа в данном сечении трубопровода. Обычно поток газа измеряется в единицах

$$pV \text{ [м}^3 \cdot \text{Па/с]} = [\text{Вт}].$$

Поток газа, протекающего во входном сечении вакуумного насоса $Q'_{\text{в}}$, называется *производительностью* насоса при данном впускном давлении $p_{\text{п}}$. Объем газа на входе в насос $S_{\text{п}} = Q'_{\text{п}} / p_{\text{п}}$ называется *быстротой действия* насоса при давлении $p_{\text{п}}$.

Поскольку во всех сечениях трубопровода, соединяющего откачиваемый объем с насосом, поток газа Q'_i одинаков, то можно записать:

$$Q'_i = Q'_{\text{п}} = p_{\text{п}} S_{\text{п}} = p S_0,$$

где p — давление на выходе из откачиваемого объема; S_0 — объем газа при давлении p , удаляемого из откачиваемого объема, называемый обычно *эффективной быстротой откачки*, или быстротой откачки объекта.

В целях получения более наглядного представления о процессах, происходящих во время откачки, проводят аналогию между вакуумной системой и электрической цепью. При этом разность давлений $p - p_{\text{п}}$ уподобляется разности потенциалов, поток Q' — силе тока, а частное от деления разности давлений на поток называют *сопротивлением* трубопровода W . Величина U , обратная сопротивлению трубопровода W , называется *проводимостью* трубопровода. При расчетах вакуумных систем чаще пользуются величиной U :

$$U = \frac{1}{W} = \frac{Q'}{p - p_{\text{п}}}, \quad (2-2)$$

причем измеряется U обычно в $\text{м}^3/\text{с}$ или $\text{л}/\text{с}$.

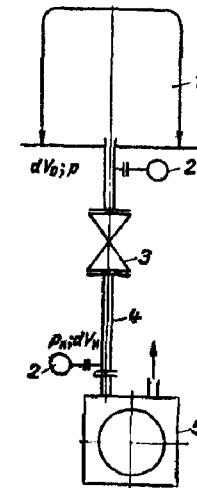


Рис. 2-1. Принципиальная схема простейшей вакуумной системы.

2-2. СОПРОТИВЛЕНИЕ И ПРОВОДИМОСТЬ СЛОЖНОГО ВАКУУМНОГО ТРУБОПРОВОДА

Как правило, вакуумные системы включают такие элементы, как затворы, ловушки, краны, и имеют трубопроводы с различными по длине поперечными сечениями. В то же время известные аналитические выражения (см. гл. 6) позволяют рассчитывать проводимости лишь для отрезков трубопроводов с постоянным или плавно меняющимся поперечным сечением. Исключение представляет расчет проводимости трубопровода по методу статистических испытаний (метод Монте-Карло), позволяющий сразу получить значение проводимости сравнительно сложных участков трубопровода (ступенчатый трубопровод, колено, трубопровод с диафрагмой и т. п.) [47, 93].

Проводимость сложных трубопроводов рассчитывается следующим образом:

а) если участки трубопровода с различными поперечными сечениями и длинами соединены последовательно, то рассчитываются порознь значения проводимостей отдельных участков, а общая проводимость сложного трубопровода или его сопротивление определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{U_{\text{пос}}} &= \sum \frac{1}{U_i} \\ W_{\text{пос}} &= \sum W_i, \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

или

где $U_{\text{пос}}$ и $W_{\text{пос}}$ — результирующие проводимость и сопротивление трубопровода, состоящего из нескольких последовательно соединенных участков;

б) если участки трубопровода с различными поперечными сечениями и длинами соединены параллельно, то отдельные участки также рассчитываются порознь, а общая проводимость сложного трубопровода или его сопротивление определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{пар}} &= \sum U_i \\ \frac{1}{W_{\text{пар}}} &= \sum \frac{1}{W_i}, \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

где $U_{\text{пар}}$ и $W_{\text{пар}}$ — результирующие проводимость и сопротивление сложного трубопровода, состоящего из не-

скольких параллельных участков; U_i и W_i — проводимости и сопротивления отдельных участков трубопровода.

Укажем, что при расчете проводимости сложного трубопровода следует учитывать эффект диафрагмирования, имеющий место при переходе от участков с большим поперечным сечением к участкам с меньшим поперечным сечением.

Сопротивление диафрагмирования рассчитывается как сопротивление входного отверстия участка трубопровода с меньшим поперечным сечением.

Заметим, что при расчете вакуумных систем со сложными трубопроводами, содержащими последовательно соединенные участки, обычно исходят из положения, что при отсутствии натеканий поток откачиваемых газов Q' одинаков во всех участках трубопровода.

При расчете трубопровода из параллельно соединенных участков считают давления в местах соединения параллельных участков одинаковыми для всех параллельных трубопроводов.

2-3. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Опыт показывает, что эффективная быстрота откачки объекта I обычно значительно меньше быстроты действия насоса S (см. рис. 2-1). Уравнение, связывающее эффективную быстроту откачки объекта S_0 и быстроту действия насоса S_n , можно вывести следующим образом. Из (2-1) и (2-2) следует:

$$Q' = S_n p_n = S_0 p = U (p - p_n). \quad (2-5)$$

Представим уравнение (2-5) в виде

$$\begin{aligned} S_0 &= U \frac{p - p_n}{p}; \\ S_n &= U \frac{p - p_n}{p_n}. \end{aligned}$$

Затем

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{U} \frac{p}{p - p_n}; \quad \frac{1}{S_n} = \frac{1}{U} \frac{p_n}{p - p_n}.$$

Вычтя из первого уравнения второе и преобразовав результат, получим:

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U},$$

или

$$S_0 = \frac{S_n U}{S_n + U}. \quad (2-6)$$

Уравнение (2-6) называется *основным уравнением вакуумной техники*, так как связывает основные параметры вакуумной системы: эффективную быстроту откачки объекта S_0 , быстроту действия насоса S_n и проводимость вакуумного трубопровода U .

Анализ уравнения (2-6) показывает, что, если проводимость трубопровода системы значительно больше скорости действия насоса, то эффективная скорость откачки объекта зависит только от насоса, и, наоборот, если проводимость трубопровода гораздо меньше скорости действия насоса, то эффективная скорость откачки приблизительно равна проводимости трубопровода и мало зависит от скорости действия насоса.

При проектных расчетах вакуумных систем эффективную скорость откачки обычно определяют исходя из газового потока и давления, а искомой является скорость действия насоса S_n , причем обычно проводимость трубопроводов, как правило, неизвестна.

В этом случае находят скорость действия насоса по формуле

$$S_n = v S_0, \quad (2-7)$$

где v — коэффициент использования насоса, равный 2 для высоковакуумных насосов и 1,1—1,25 для механических вакуумных насосов.

2-4. ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАЗА В ВАКУУМНЫХ СИСТЕМАХ

Во время работы вакуумной системы газ в откачиваемом объеме расширяется, в результате чего меняется его температура. Непостоянство температуры газа в вакуумных системах сказывается на точности их расчета, причем это обстоятельство особенно необходимо учитывать при наличии в системе конденсирующихся паров.

Вместе с тем при малых давлениях (меньше 10 Па) в вакуумной системе процесс расширения газа можно считать *изотермическим*, так как расширение обычно происходит медленно и газ успевает воспринимать тепло от окружающих стенок, сохраняя свою температуру практически постоянной, примерно равной температуре

стенок. При изотермическом процессе справедлив закон Бойля — Мариотта (1-14).

При достаточно высоких давлениях в вакуумной системе расширение газа может происходить столь быстро, что температура окружающих стенок практически не успевает сказаться на температуре газа. Процесс изменения состояния газа, при котором передачей тепла газу от окружающих стенок можно пренебречь, называется *адиабатическим*. Адиабатический процесс описывается уравнением

$$\left. \begin{aligned} pV_{уд}^{\kappa} &= \text{const} \\ \text{или} \\ \frac{p}{p_0} &= \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\kappa} \quad \text{и} \quad \frac{p}{p_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{1/\kappa}, \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

где $\kappa = C_{pуд}/C_{vуд}$ [см. уравнение (1-66)]; $C_{pуд}$ и $C_{vуд}$ — удельные теплоемкости газа соответственно при постоянном давлении и при постоянном объеме; p и p_0 , V и V_0 — параметры, характеризующие состояние газа в начале и в конце процесса расширения.

Температура, давление и плотность газа при адиабатическом расширении связаны следующим соотношением:

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}. \quad (2-9)$$

Как нетрудно видеть, уравнения (1-14) и (2-8) относятся соответственно к двум крайним по своему характеру процессам изменения состояния газа.

При практической работе приходится иметь дело с промежуточным процессом, когда между газом и стенками имеется неполный теплообмен. В этом случае соотношение между давлением и удельным объемом газа описывается уравнением

$$pV_{уд}^n = \text{const}, \quad (2-10)$$

где $1 < n < \kappa$.

Процесс изменения состояния газа, описываемый уравнением (2-10), называется *политропным*, а n — показателем политропы.

2.5. КРИТЕРИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ТРУБОПРОВОДАХ

Во время откачки вакуумной системы давление газа обычно уменьшается от атмосферного до весьма малых величин, и одновременно с этим меняются режимы течения газа в трубопроводах.

В самом начале процесса откачки при сравнительно высоких давлениях и значительных скоростях газа наблюдается *турбулентный* режим течения, характеризующийся хаотическим нерегулярным движением взаимодействующих между собой масс газа, при этом давление носит пульсирующий характер. Строгий теоретический анализ этого вида течения в настоящее время отсутствует, и при рассмотрении турбулентного режима используют статистический подход.

При постепенном уменьшении давления скорости течения газа также уменьшаются, характер потока меняется, образуются параллельно перемещающиеся слои газа. Скорости перемещений этих слоев относительно стенок постепенно возрастают от нуля до максимума в направлении от стенки трубопровода к его оси. Этот вид течения газа называется *ламинарным* или *вязкостным*.

Естественно, что закономерности турбулентного и ламинарного режимов течения газа будут различными, и поэтому важно знать границы режимов течения газа.

Переход от ламинарного течения к турбулентному обуславливается достижением критического значения некоторого безразмерного числа Рейнольдса, которое рассчитывается по формуле

$$Re = \frac{u_{\text{газ}} d \rho}{\eta}, \quad (2-11)$$

где $u_{\text{газ}} = Q'/A\rho$ — средняя по расходу скорость газа; d — характеристический размер поперечного сечения трубопровода (для цилиндрического трубопровода — его диаметр); ρ — давление газа; ρ — плотность газа; η — коэффициент вязкости; Q' — поток газа; A — площадь поперечного сечения трубопровода.

Так как измерение скорости течения газа представляет известные технические трудности, число Рейнольдса

чаще обычно преобразуют с помощью формулы (1-19) и выражают через поток газа Q' :

$$Re = \frac{4m}{\pi k T \eta} \frac{Q'}{d}. \quad (2-12)$$

где k — постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); m — масса молекулы, кг; T — температура, К; η — коэффициент вязкости; Q' — поток газа, протекающего через трубопровод, м³·Па/с; d — диаметр трубопровода, м.

Критическим значением числа Рейнольдса, выше которого может существовать только турбулентный режим, принято считать

$$Re_{\text{кр}} = 2200. \quad (2-13)$$

Устойчивое ламинарное течение имеет место при

$$Re < 1200. \quad (2-14)$$

В промежуточной области могут существовать как турбулентный, так и ламинарный режимы течения газа. Указанные границы режимов течения газа могут смещаться в зависимости от конкретных условий — формы трубопровода, шероховатости его стенок, наличия местных сопротивлений. Наконец, по длине даже одного цилиндрического трубопровода могут существовать различные режимы течения газа. Следует учитывать, что на входе в трубопровод имеет место равномерное распределение скоростей по сечению и лишь затем на некотором расстоянии L_d от входа в трубопровод течение упорядочивается и устанавливается параболический профиль скоростей, характерный для ламинарного режима течения. Для определения длины этого начального участка можно воспользоваться выражением

$$L_d = 0,065 d Re, \quad (2-15)$$

где d — диаметр трубопровода.

Таким образом, при длине трубопровода

$$L > 0,065 d Re \quad (2-16)$$

и

$$Re \leq 2200$$

проводимость трубопровода следует рассчитывать в соответствии с закономерностями, характеризующими ламинарный режим течения, называемый в вакуумной технике *вязкостным*.

Величина потерь давления по длине трубопровода для ламинарного режима может быть выражена с помощью коэффициента сопротивления ζ , обратно пропорционального числу Рейнольдса:

$$\zeta = \frac{K}{Re}, \quad (2-17)$$

где K — коэффициент пропорциональности, зависящий от формы поперечного сечения трубопровода (см. гл. 6).

При турбулентном режиме течения газа для вычисления значений проводимости трубопроводов обычно используется формула Блазиуса:

$$\zeta = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (2-18)$$

Формула (2-18) дает достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными при значениях числа Рейнольдса до 10^6 .

В процессе откачки вакуумной системы давление уменьшается настолько, что средняя длина свободного пути молекул становится соизмеримой с размерами трубопровода и даже начинает превышать эти размеры. Влияние внутреннего трения при этом постепенно уменьшается, так как молекулы газа почти не сталкиваются между собой, а взаимодействуют только со стенками трубопровода. Такой режим течения газа называется *молекулярным*.

Метод расчета проводимости трубопроводов при молекулярном режиме течения газа был разработан Кнудсенем. Расчеты Кнудсена базируются на законе косинуса (см. гл. 1), а рекомендованные соотношения обеспечивают получение результатов с погрешностью не более 5% при

$$\frac{\lambda}{d} \geq \frac{1}{3}, \quad (2-19)$$

где λ — средняя длина свободного пути молекул газа; d — диаметр трубопровода.

Учтя соотношение (1-30), можно записать, что режим течения для воздуха при 20°C будет молекулярным, если

$$\bar{p}d \leq 0,02 \text{ Па}\cdot\text{м}, \quad (2-20)$$

где \bar{p} — среднее по длине трубопровода давление: $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$; p_1 и p_2 — давления на концах трубопровода.

При отношениях средней длины свободного пути молекул к диаметру трубопровода d

$$\frac{\lambda}{d} \leq 5 \cdot 10^{-3} \quad (2-21)$$

закономерности, характерные для ламинарного, или вязкостного, режима течения газа, дают все возрастающие погрешности.

Соотношение (2-21) для воздуха при 20°C может быть преобразовано к виду

$$\bar{p}d \geq 1,33 \text{ Па}\cdot\text{м}, \quad (2-22)$$

в связи с чем при значении произведения $\bar{p}d \geq 1,33 \text{ Па}\cdot\text{м}$ режим течения воздуха будет *вязкостным*. В области

$$0,02 > \bar{p}d > 1,33 \text{ Па}\cdot\text{м} \quad (2-23)$$

режим течения воздуха будет *промежуточным*, или *молекулярно-вязкостным*, и проводимости трубопроводов рассчитываются по скорректированным формулам для вязкостного или молекулярного режимов течения газа.

2-6. РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОТКАЧКИ

Известные закономерности для расчета проводимости трубопроводов вакуумных систем позволяют рассматривать *стационарные* режимы течения газа, т. е. такие, когда давление и поток неизменны во времени, а режим течения газа одинаков по всей длине трубопровода. Однако при откачке реальных вакуумных систем довольно часто упомянутые условия не соблюдаются, а искомой величиной являются время достижения заданного давления либо величина давления, получаемая по истечении определенного времени откачки.

Решение этих задач в общем виде представляет значительные математические трудности, поэтому для упрощения расчетов решают задачу для так называемого *квазистационарного* режима течения газа.

Квазистационарным называют режим течения газа, при котором разность давлений на концах трубопровода мала по сравнению со средним давлением в нем; объем трубопровода значительно меньше объема откачиваемого сосуда; в трубопроводе в каждый момент времени существует только один режим течения газа. Иными словами, квазистационарный режим течения га-

за имеет место в вакуумной системе с сосредоточенными постоянными, для которой можно считать поток газа в любом сечении трубопровода одинаковым в каждый момент времени

Эти условия можно выразить математически через постоянные времени, записываемые как отношение соответствующего объема к скорости удаления газа из него.

Для откачиваемого объема V постоянная времени

$$\tau_{в1} = \frac{V}{S_0}, \quad (2-24)$$

где S_0 — эффективная быстрота откачки.

Для трубопровода с площадью сечения A и длиной L

$$\tau_{в2} = \frac{AL}{U}, \quad (2-25)$$

где U — проводимость трубопровода.

Отсюда условие существования квазистационарного режима течения можно записать [75] как

$$\frac{\tau_{в1}}{\tau_{в2}} = \frac{VU}{S_0AL} \gg 1. \quad (2-26)$$

Реальные вакуумные системы обычно удовлетворяют условию (2-26) Исключение может составлять лишь начальный период откачки, продолжительность которого относительно невелика, а также откачка с помощью централизованных форвакуумных систем (ЦФС)

В начальный период откачки из сосуда I объёмом V (см рис 2-1) за время dt удаляется масса газа, равная

$$\frac{M}{R_0 T} S_0 p dt = \frac{M}{R_0 T_{нач}} S_0 p^{1/n} p_{нач}^{\frac{n-1}{n}} dt, \quad (2-27)$$

где $T_{нач}$ и $p_{нач}$ — температура и давление газа в сосуде I в момент начала откачки, T и p — меняющиеся в процессе откачки температура и давление газа в сосуде I , n — показатель политропы.

За этот же промежуток времени в объем сосуда поступает с постоянной скоростью масса газа, равная

$$Q'_\Sigma \frac{M}{R_0 T_{нач}} dt, \quad (2-28)$$

где Q'_Σ — суммарный поток газа, поступающий в сосуд I .

Изменение массы газа в сосуде I за время dt составит

$$\frac{M}{R_0} V \frac{p_{нач}^{\frac{n-1}{n}}}{T_{нач}} d(p^{1/n}). \quad (2-29)$$

Уравнение материального баланса, таким образом, имеет вид

$$\frac{M}{R_0} V \frac{p_{нач}^{\frac{n-1}{n}}}{T_{нач}} d(p^{1/n}) = \frac{M}{R_0 T_{нач}} Q'_\Sigma dt - \frac{M}{R_0 T_{нач}} S_0 p^{\frac{n-1}{n}} p^{1/n} dt.$$

После разделения переменных получим:

$$dt = \frac{d(p^{1/n})}{\frac{Q'_\Sigma S_0}{\frac{n-1}{n-1} - \frac{S_0}{V} p^{1/n}}}, \quad (2-30)$$

откуда

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_{нач}^{1/n} - \frac{Q'_\Sigma}{\frac{n-1}{n-1}}}{p^{1/n} - \frac{Q'_\Sigma}{\frac{n-1}{n-1}}}. \quad (2-31)$$

При малой быстроте откачки температура газа в сосуде практически не меняется Так как в этом случае $n \approx 1$, то выражение (2-31) упрощается

$$t = \frac{V}{S_0} \ln \frac{p_{нач} - Q'_\Sigma/S_0}{p - Q'_\Sigma/S_0}. \quad (2-32)$$

При весьма длительной откачке, т е при $t \rightarrow \infty$, имеем.

$$p_{ост} = \left(\frac{Q'_\Sigma}{S_0 p_{нач}^{\frac{n-1}{n}}} \right)^n, \quad (2-33)$$

где $p_{ост}$ — наименьшее давление, которое может быть достигнуто (предельное или остаточное давление) в системе При $n \approx 1$

$$p_{ост}' = Q'_\Sigma/S_0. \quad (2-34)$$

Таким образом, формула (2-32) позволяет рассчитывать длительность откачки при постоянных Q'_z , V и S_0 , что обычно бывает при турбулентном и вязкостном режимах течения газа, так как в этом случае Q'_z можно не учитывать, а S_0 практически полностью определяется быстротой действия насоса S_{II} , которая для механических вакуумных насосов в достаточно широком диапазоне давлений остается практически постоянной.

В тех случаях, когда Q'_z или S_0 меняются в процессе откачки, весь период откачки разбивают на отдельные участки по давлению, внутри каждого из которых поток газовыделения или поток натекания, характер процесса расширения газа и эффективную быстроту откачки можно условно принимать постоянными. При этом общее время откачки равно:

$$t_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^{k} t_i, \quad (2-35)$$

где k — число участков, на которое разбит период откачки; t_i — длительность откачки на i -м участке, рассчитываемая по формулам (2-31) или (2-32).

Чаще всего наибольшее влияние на результаты расчета длительности откачки оказывает только изменение эффективной скорости откачки объема ввиду изменения проводимости трубопроводов, которая при вязкостном режиме течения (см. гл. 6) может быть принята пропорциональной среднему давлению в трубопроводе:

$$U_{\text{н.т.к.}} = \alpha_{\text{н.т.к.}} \beta_{\text{вязк}} \frac{p + p_{II}}{2}, \quad (2-36)$$

где p и p_{II} — давления газа на концах трубопровода; $\alpha_{\text{вязк}}$ — множитель, зависящий от свойств протекающего по трубопроводу газа (см. гл. 6); $\beta_{\text{вязк}}$ — множитель, зависящий от геометрических размеров и формы поперечного сечения трубопровода (см. гл. 6). В этом случае значение эффективной скорости откачки в соответствии с (2-6) можно записать в виде

$$S_{\text{н}} = \frac{S_{II} \alpha_{\text{вязк}} \beta_{\text{вязк}} \frac{p + p_{II}}{2}}{S_{II} + \alpha_{\text{н.т.к.}} \beta_{\text{вязк}} \frac{p + p_{II}}{2}}. \quad (2-37)$$

Учитывая, что всегда количество откачиваемого газа в единицу времени

$$Q' = p S_0,$$

и пренебрегая натеканием и газовыделением

$$Q' = - \frac{d}{dt} (pV) = - V \frac{dp}{dt},$$

получаем уравнение

$$p \frac{S_{II} \alpha_{\text{вязк}} \beta_{\text{вязк}} \frac{p + p_{II}}{2}}{S_{II} + \alpha_{\text{н.т.к.}} \beta_{\text{вязк}} \frac{p + p_{II}}{2}} = - V \frac{dp}{dt}. \quad (2-38)$$

Так как количество газа Q' , удаляемого в единицу времени из объема V , равно количеству газа, откачиваемого насосом, то

$$Q' = V \frac{dp}{dt} = p_{II} S_{II}$$

и

$$p_{II} = - \frac{V}{S_{II}} \frac{dp}{dt}. \quad (2-39)$$

После подстановки в уравнение (2-38) значения p_{II} из (2-39) и преобразований получим:

$$\left(\frac{V}{S_{II}} \frac{dp}{dt} \right)^2 + \frac{2V}{\alpha_{\text{вязк}} \beta_{\text{вязк}}} \frac{dp}{dt} + p^2 = 0. \quad (2-40)$$

Решив уравнение (2-40) относительно dp/dt и отбросив отрицательный корень, получим:

$$dt = \frac{\frac{V}{S_{II}} dp}{\frac{S_{II}}{\alpha_{\text{вязк}} \beta_{\text{вязк}}} - \sqrt{\frac{S_{II}^2}{\alpha_{\text{вязк}}^2 \beta_{\text{вязк}}^2} + p^2}}. \quad (2-41)$$

и после интегрирования

$$t = \frac{V}{\alpha_{\text{вязк}} \beta_{\text{вязк}} p} + \frac{V}{S_{II}} \left\{ \frac{\sqrt{\frac{S_{II}^2}{\alpha_{\text{вязк}}^2 \beta_{\text{вязк}}^2} + p^2}}{p^2} - \ln \left[p + \sqrt{\frac{S_{II}^2}{\alpha_{\text{вязк}}^2 \beta_{\text{вязк}}^2} + p^2} \right] \right\} + \text{const.} \quad (2-42)$$

Из начальных условий находим значение постоянной интегрирования

$$\text{const} = \frac{V}{S_n} \left[\ln \left(\sqrt{\frac{S_n^2}{\alpha^2_{\text{вязк}} \beta^2_{\text{вязк}}} + (p_{\text{нач}})^2} + p_{\text{нач}} \right) - \frac{\sqrt{\frac{S_n^2}{\alpha^2_{\text{вязк}} \beta^2_{\text{вязк}}} + (p_{\text{нач}})^2}}{p_{\text{нач}}} \right] - \frac{V}{\alpha_{\text{вязк}} \beta_{\text{вязк}} p_{\text{нач}}}, \quad (2-43)$$

где $p_{\text{нач}}$ — начальное давление в откачиваемом объеме (при $t=0$).

Аналогичные выражения времени откачки могут быть получены для турбулентного, молекулярно-вязкостного и молекулярного режимов течения газа, однако для турбулентного и молекулярно-вязкостного режимов эти выражения получаются весьма громоздкими, и оказывается более целесообразным вести расчет в соответствии с (2-35). Кроме того, при молекулярном и в ряде случаев при молекулярно-вязкостном режимах течения газа решающее влияние на длительность откачки оказывают натекание и меняющееся в широких пределах газовыделение.

Так, в высоковакуумных системах давление в откачиваемом объеме в каждый данный момент времени определяется равновесием между удаляемым с помощью вакуумного насоса потоком газа и потоком газа, поступающим в откачиваемый объем. Поток газа, поступающий в откачиваемый объем, суммируется из потока газов $Q'_{\text{изд}}$, поступающих из обрабатываемых изделий, газовыделения со стенок вакуумной системы $Q'_{\text{газ}}$, обращенных в вакуумную полость, и потока газов $Q'_{\text{нат}}$, натекающих в систему. Таким образом,

$$Q'_S = Q'_{\text{изд}} + Q'_{\text{газ}} + Q'_{\text{нат}} = p_{\text{н}} S_{\text{н}} = p S_0, \quad (2-44)$$

где $p_{\text{н}}$ — давление во входном сечении насоса; $S_{\text{н}}$ — быстрота действия насоса при давлении $p_{\text{н}}$; p — давление в откачиваемом объеме; S_0 — эффективная быстрота откачки объема при давлении p .

Для каждого отрезка времени можно рассчитать давление, так как $Q'_{\text{изд}}$ и $Q'_{\text{газ}}$ являются функциями времени откачки, т. е.

$$p_{\text{н}} = \frac{Q'_{\text{изд}} + Q'_{\text{газ}} + Q'_{\text{нат}}}{S_0}. \quad (2-45)$$

Величины $Q'_{\text{изд}i}$ и $Q'_{\text{газ}i}$ определяются как результат выделения газов, содержащихся в объеме изделий и сорбированных на поверхностях, ограничивающих вакуумный объем. Методы расчета величин $Q'_{\text{изд}i}$ и $Q'_{\text{газ}i}$ изложены в гл. 3 и 4.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАЗОВ С ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ

3-1. ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ И СТЕНОК ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

Как указывалось выше, давление в вакуумной системе при молекулярном режиме течения газа самым существенным образом зависит от газовыделения стенок, ограничивающих вакуумный объем. Поэтому определение газовыделения является одной из основных задач при расчете вакуумных систем. При расчете газовыделения следует принимать во внимание следующее:

1) газовыделение зависит как от материала, так и от предшествующей технологической обработки и состояния атмосферы, в которой находился материал до помещения его в вакуум;

2) скорость газовыделения пропорциональна истинной поверхности материала;

3) для большинства конструкционных материалов скорость газовыделения возрастает с повышением температуры;

4) скорость газовыделения из материала постепенно уменьшается со временем;

5) с достаточной для инженерных расчетов точностью можно принять, что скорость газовыделения при давлениях ниже 10^{-1} Па и температурах выше 600 К не зависит от давления в вакуумном объеме до тех пор, пока газосодержание материала сравнительно велико.

Газовыделение материала обусловлено как газами, связанными с поверхностью материала, так и газами, находящимися внутри него. Процессы, происходящие при удалении газов с поверхности и газов, находящихся в материале, существенно различны и должны описываться отличающимися закономерностями, причем в большинстве случаев удаление газа с поверхности и из глубины материала идет одновременно.

Рассмотрим вначале процесс удаления газов с поверхности, а затем из толщи материала.

3-2. АДСОРБЦИЯ И ДЕСОРБЦИЯ ГАЗОВ

Процессы адсорбции и десорбции газов играют важную роль в вакуумной технике, поскольку десорбция газа затрудняет получение низких давлений, а адсорбция газа в ряде случаев, например в вакуумных насосах и ловушках, способствует этому.

В зависимости от характера взаимодействия газов с поверхностью твердого тела различают *физическую* и *химическую адсорбцию (хемосорбцию)* [22, 81].

При физической адсорбции энергия связи молекул газа с поверхностью большинства материалов сравнительно невелика (до $4 \cdot 10^4$ Дж/моль), а характер взаимодействия определяется силами Ван-дер-Ваальса.

Процесс хемосорбции подобен образованию химического соединения. Энергия связи при этом может составлять 10^6 Дж/моль, а сам процесс в отличие от физической адсорбции нередко бывает необратим.

Заметим, что часто оба процесса адсорбции протекают одновременно. Характеризовать адсорбцию можно числом поглощенных поверхностью молекул или объемом поглощенного газа.

При рассмотрении физической адсорбции количество поглощенного газа обычно относят к единице поверхности твердого тела. Очевидно, что с изменением количества адсорбированного газа должны меняться характер взаимодействия газа с поверхностью твердого тела и энергия связи. Качественное отличие наблюдается при величинах покрытия поверхности твердого тела газом в количествах соответственно менее и более одного мономолекулярного слоя. При этом предполагается, что на поверхности твердого тела имеется определенное число мест, которые могут быть заняты молекулами газа. Если все вакантные места заняты молекулами, то говорят, что заполнение поверхности твердого тела равно одному *монослою*. Заполнение поверхности адсорбированным газом можно характеризовать коэффициентом θ :

$$\theta = \frac{N_{\text{пов}}}{N_{1\text{пов}}}, \quad (3-1)$$

где $N_{\text{пов}}$ — количество молекул, адсорбированных на единице поверхности твердого тела; $N_{1\text{пов}}$ — число мест на единице поверхности, которые могут быть заняты адсорбированными молекулами (число молекул в заполненном мономолекулярном слое). Число молекул $N_{1\text{пов}}$ рассчитывают, полагая, что молекулы газа покрывают поверхность твердого тела с шагом, равным их диаметру σ (см. приложение 1). При этом получаются значения от $0,4 \cdot 10^{19}$ до $2,5 \cdot 10^{19}$ м⁻² (табл. 3-1). Обычно при ориентировочных расчетах принимают

$$N_{1\text{пов}} = 0,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}. \quad (3-2)$$

Таблица 3-1

Теоретические значения числа молекул в мономолекулярном слое газа $N_{1\text{пов}}$ на 1 м² поверхности

Газ	He	Ne	H ₂	O ₂	Ar	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
$N_{1\text{пов}} \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}$	0,42	1,72	1,52	0,87	0,85	0,81	0,81	0,53	0,53
Количество газа $Q_1 \cdot 10^2$ на 1 м ² поверхности при $T \approx 300$ К в pV -единицах, м ³ ·Па	9,76	6,94	6,14	3,51	3,43	3,27	3,27	2,14	2,14

Примечание. Количество газа на 1 м² поверхности в pV -единицах будет равно:
 $Q_1 = 1,384 \cdot 10^{-23} N_{1\text{пов}} T$, м³·Па.

Гораздо чаще количество адсорбированного газа выражают в единицах объема при определенных температуре и давлении, отнесенных к единице площади гладкой поверхности адсорбента (табл. 3-1). Вместе с тем фактическая поверхность адсорбента не всегда поддается измерению и нередко неизвестна. Поэтому часто количество адсорбированного газа относят к 1 кг адсорбента или другой единице массы.

В случае, когда покрытие превышает один монослой, процесс адсорбции начинает напоминать конденсацию, а энергия связи уменьшается и начинает приближаться к теплоте испарения. При заполнении поверхности твердого тела, существенно меньше одного монослоя, можно считать количество адсорбированного газа Q пропорциональным давлению p , так как усло-

вия поглощения молекул газа поверхностью твердого тела не будут зависеть от заполнения. Для описания процесса адсорбции в этом случае Фрейндлихом [37] предложена эмпирическая формула

$$Q = k_{\Phi} p^{1/n_{\Phi}}, \quad (3-3)$$

где k_{Φ} и n_{Φ} — постоянные, зависящие от природы адсорбента и адсорбируемого газа.

Уравнение (3-3) обычно записывают в логарифмической форме:

$$\lg Q = \lg k_{\Phi} + \frac{1}{n_{\Phi}} \lg p, \quad (3-4)$$

и тогда в логарифмических координатах оно описывается прямой линией, тангенс угла наклона которой равен $1/n_{\Phi}$. При $n_{\Phi}=1$ между количеством поглощенного газа и давлением существует прямая пропорциональность, аналогичная закону Генри для растворов.

Кривые $V=f(p)$, снятые при постоянной температуре, представляют собой *изотермы* адсорбции.

Уравнение (3-4) описывает адсорбцию инертных газов и окиси углерода на угле, водорода на порошке вольфрама при небольших давлениях и соответственно малых заполнениях поверхности [24].

При сравнительно больших заполнениях поверхности изотермы адсорбции начинают отклоняться от прямой линии в логарифмических координатах, т. е. уравнение Фрейндлиха не выполняется.

Аналитическое выражение, теоретически гораздо более обоснованное, было получено Ленгмюром.

В стационарном состоянии число адсорбирующихся атомов или молекул должно быть равно числу десорбирующихся:

$$\alpha N_u = \mu, \quad (3-5)$$

где α — коэффициент прилипания, характеризующий долю адсорбирующихся молекул на поверхности твердого тела; N_u — число молекул, ударяющихся о единицу поверхности [см. уравнение (1-8)]; μ — число молекул, десорбирующихся в единицу времени с единицы поверхности.

Уравнение (3-5) можно записать в несколько иной форме. Тогда скорость изменения числа адсорбированных на поверхности молекул равна:

$$\frac{dN}{dt} = \alpha N_u - \mu = 0. \quad (3-6)$$

В предположении, что адсорбированные молекулы не взаимодействуют между собой, можно считать количество десорбирующихся молекул пропорциональным количеству адсорбированных:

$$\mu = \theta \mu_1, \quad (3-7)$$

где μ_1 — число молекул, десорбирующихся при полностью покрытой молекулами газа поверхности; θ — коэффициент заполнения поверхности молекулами адсорбированного газа.

Число десорбирующихся с поверхности молекул, очевидно, должно быть обратно пропорционально времени их пребывания в адсорбированном состоянии на поверхности твердого тела, и, таким образом, вместо уравнения (3-7) можно записать:

$$\mu = \frac{N_{1\text{пов}} \theta}{t_s}, \quad (3-8)$$

где t_s — время пребывания молекулы на поверхности в адсорбированном состоянии.

Френкелем было предложено следующее выражение для t_s [78]:

$$t_s = \tau_0 e^{E_{\text{дес}}/R_0 T}, \quad (3-9)$$

где τ_0 — коэффициент, связанный с периодом колебаний атомов на поверхности адсорбента; $E_{\text{дес}}$ — энергия десорбции; T — температура поверхности; R_0 — газовая постоянная.

Коэффициент τ_0 может меняться в довольно широких пределах в зависимости от свойств материала и газа. Так, например, для инертных газов на графите $\tau_0 = (7-10) \cdot 10^{-13}$ с, на стекле $\tau_0 \approx 2 \cdot 10^{-14}$ с, для атомарного кислорода на вольфраме $\tau_0 = 8 \cdot 10^{-14}$ с, а для атомарного водорода $\tau_0 = 5 \cdot 10^{-14}$ с [17]. В расчетах обычно принимают $\tau_0 = 10^{-13}$ с.

Значения энергии десорбции некоторых газов с поверхности различных материалов приведены в табл. 3-2.

Таблица 3-2

Энергия сорбции газов на некоторых материалах

Газ	Материал подложки	Энергия десорбции $E_{дес}$, кДж/моль	Энергия хемосорбции $E_{хем}$, кДж/моль	Энергия физической адсорбции $E_{ад}$, кДж/моль	Примечание
O ₂	W	615	812	—	[37]
H ₂	W	310	192	—	—
N ₂	W	650	356	—	—
CO	W	~420	~420	9,6	—
Xe	W	—	—	38	—
Kr	W	—	—	19	—
Ar	W	—	—	8	—
H ₂	Ni	280	125	—	—
CO ₂	W	—	510	23	—
NH ₃	W	—	293	—	—
H ₂	Mo	—	~165	—	—
H ₂	Ta	—	192	—	—
O ₂	Ni	—	480	—	—
H ₂	Fe	—	134	—	—
N ₂	Fe	—	167	—	—
H ₂	Ir	—	109	—	—
H ₂	Rh	—	109	—	—
H ₂	Co	—	~100	—	—
H ₂	Pt	—	113	—	—
O ₂	Pt	—	280	—	—
H ₂	Pd	—	113	—	—
NH ₃	Ni	—	150	—	—
CO	Ni	—	146	—	—
H ₂	Cu	—	34	—	—
Xe	Mo	—	—	~34	—
Xe	Ta	—	—	~22	[37]
CO	Fe	—	188	—	—
CO ₂	Активированный уголь	—	—	27 ÷ 34	[24]
Ar	Fe (невосстановленное)	—	—	13,7	—
Ar	Fe (восстановленное)	—	—	13,4	—
Ar	Ag	—	—	14,6	—
Ar	Pt	—	—	13,7	—
N ₂	Fe (невосстановленное)	—	—	13,7	—
N ₂	Fe (восстановленное)	—	—	8,9	—
N ₂	Ag	—	—	15	—
N ₂	Pt	—	—	14,1	—
CO	Fe (восстановленное)	—	—	14,2	—

Продолжение табл. 3-2

Газ	Материал подложки	Энергия десорбции $E_{дес}$, кДж/моль	Энергия хемосорбции $E_{хем}$, кДж/моль	Энергия физической адсорбции $E_{ад}$, кДж/моль	Примечание
CO	Ag	—	—	13,3	—
CO	Pt	—	—	15	[24]
H ₂ O	Уголь	—	—	4,55	258 К
H ₂ O	"	—	—	42	283 К
H ₂ O	"	—	—	39	310 К
H ₂ O	"	—	—	35	350 К
H ₂ O	"	—	—	30	400 К
H ₂ O	"	—	—	21,8	460 К
H ₂ O	Хлопок, целлюлоза	—	—	66	—
H ₂ O	Бумага	—	—	142	[24]
N ₂	Пористое стекло	—	—	13,4	—
O ₂	То же	—	—	12,5	—
Ar	" "	—	—	11	—
CH ₄	" "	—	—	12,5	—
C ₂ H ₆	" "	—	—	22,2	—
Ne	Пористый уголь	—	—	6,7	—
H ₂	То же	—	—	10	—
Ar	" "	—	—	20,5	—
CH ₄	" "	—	—	24,6	—
H ₂ O	SiO ₂	27,2	—	—	340—360 К
H ₂ O	Al ₂ O ₃	27,2	—	—	340—360 К
H ₂ O	SiO ₂	79,5	—	—	580—600 К
H ₂ O	Al ₂ O ₃	105	—	—	580—600 К
H ₂ O	Силикагель	71—84	—	—	Уменьшается с заполнением подложки
H ₂ O	TiO ₂ , ZnO, GeO ₂ , SiO ₂	71—84	—	—	—
H ₂ O	Цеолит	125—145	—	—	—
H ₂ O	Графит	167	—	—	Чистая поверхность графита
H ₂ O	Графит	83,5	—	—	—
H ₂ O	Окисленная поверхность графита	46	—	—	—

Количество адсорбирующихся молекул можно считать пропорциональным доле поверхности, не заполненной газом:

$$N = \alpha N_u (1 - \theta). \quad (3-10)$$

В этом случае уравнение (3-6) запишется в виде

$$\frac{dN}{dt} = \alpha N_u (1 - \theta) - \frac{N_{\text{пов}} \theta}{t_s} = 0, \quad (3-11)$$

и после преобразования

$$\theta = \frac{\alpha N_u}{\frac{N_{\text{пов}}}{t_s} + \alpha N_u}. \quad (3-12)$$

Если использовать (1-8), (1-16) и (1-23), то после подстановки и преобразований получим:

$$\theta = \frac{bp}{1 + bp}, \quad (3-13)$$

где

$$b = \frac{\alpha t_s}{N_{\text{пов}} \sqrt{2\pi mkT}}.$$

Уравнение (3-12) описывает гиперболическую изотерму адсорбции Ленгмюра. Значения коэффициента b в уравнении (3-13) для ряда систем «газ — металл», применимых при внешних давлениях меньше 10^2 Па, приведены в [24].

При весьма малых давлениях уравнение (3-12) имеет вид:

$$\theta \simeq bp, \quad (3-14)$$

т. е. аналогично закону Генри.

В случае, если при адсорбции происходит диссоциация молекул на атомы, для двухатомных газов вместо (3-10) получим:

$$\frac{dN}{dt} = \alpha N_u (1 - \theta)^2 - \frac{N_{\text{пов}} \theta^2}{t_s}, \quad (3-15)$$

так как для адсорбции молекулы на поверхности должны быть свободны две площадки, а для осуществления десорбции на соседних площадках должны быть два атома. В результате для сорбции двухатомного газа в атомарном состоянии имеем:

$$\theta = \frac{\sqrt{bp}}{1 + \sqrt{bp}}. \quad (3-16)$$

Для трехатомного газа в формуле (3-13) вместо квадратного корня должен быть кубический корень.

В общем виде можно записать:

$$\theta = \frac{(bp)^{1/3}}{1 + (bp)^{1/3}}. \quad (3-17)$$

Таким образом, уравнение Ленгмюра описывает адсорбцию, в том числе хемосорбцию, в достаточно широком диапазоне давлений. Вместе с тем имеются экспериментальные данные, указывающие на наличие *полимолекулярной* адсорбции даже при малых значениях коэффициента заполнения θ . Применительно к полимолекулярной адсорбции выведено уравнение Брунауэра — Эмметта — Теллера (БЭТ), объясняющее ход изотерм адсорбции различного вида, записываемое обычно в следующей форме:

$$\theta = \frac{\frac{p}{p_{\text{нас}}} e^{\frac{E_{\text{ад}} - E_{\text{кон}}}{R_0 T}}}{\left(1 - \frac{p}{p_{\text{нас}}}\right) \left[1 + \frac{p}{p_{\text{нас}}} \left(e^{\frac{E_{\text{ад}} - E_{\text{кон}}}{R_0 T}} - 1\right)\right]}, \quad (3-18)$$

где $E_{\text{ад}}$ — энергия адсорбции моля газа; $E_{\text{кон}}$ — энергия конденсации моля газа; $p_{\text{нас}}$ — давление насыщенных паров адсорбируемого вещества при температуре T .

Отметим, что полимолекулярная адсорбция наблюдается лишь при сравнительно высоких давлениях и значительных энергиях адсорбции.

При низких давлениях, обычно достигаемых в вакуумных системах, уравнение БЭТ сводится к уравнению Ленгмюра, которое мы и будем в основном использовать.

При инженерных расчетах гораздо удобнее вместо количества молекул, с которыми оперируют в уравнениях (3-10) и (3-11), использовать значения участвующего в процессах адсорбции газа в pV -единицах. При этом удельные потоки адсорбирующегося и десорбирующегося газа могут быть определены по формулам:

$$q'_{\text{ад}} = 1,384 \cdot 10^{-23} \alpha N_u (1 - \theta) T, \quad \text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (3-19)$$

где α — коэффициент прилипания; N_u — число молекул, ударяющихся о единицу поверхности; T — абсолютная температура;

$$q'_{\text{дес}} = 1,384 \cdot 10^{-23} \frac{N_{\text{пов}} \theta}{t_s} T, \quad \text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (3-20)$$

где $N_{\text{пов}}$ — количество мест на единичной поверхности, которые могут быть заняты адсорбированными молекулами; t_s — время пребывания молекулы в адсорбированном состоянии; θ — коэффициент заполнения.

Укажем, что при расчетах процессов адсорбции здесь и в дальнейшем следует учитывать фактическую величину поверхности с учетом ее микрогеометрии. При этом значения $N_{\text{пов}}$ и $Q_{\text{пов}}$ в формулах (3-8), (3-11) — (3-13), (3-15), (3-20) и в дальнейшем должны быть увеличены соответственно отношению фактической площади поверхности к геометрической. Это обстоятельство особенно существенно в случае процессов адсорбции на металлах, так как даже для компактных полированных поверхностей отношение фактической и геометрической площадей может быть равно 5—10, а для сравнительно грубо обработанных поверхностей компактных металлов может составлять 20 и более.

3-3. СКОРОСТИ АДСОРБЦИИ И ДЕСОРБЦИИ

Уравнения (3-3), (3-13), (3-17) и (3-18) позволяют рассчитать количество адсорбированного газа или степени заполнения поверхности в стационарных условиях.

Так, степень заполнения азотом $N_{\text{пов}}^{N_2} = 0,81 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}$ поверхности образца из железа ($E_{\text{ад}} = 13,7 \text{ кДж/моль}$) (см. табл. 3-2), находящегося на воздухе ($p_{N_2} = 7,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$) при комнатной температуре, может быть определена по уравнению (3-13). В предположении, что $\alpha = 1$, получим $\theta = 7,34 \cdot 10^{-3}$, т. е. даже на воздухе в результате физической адсорбции заполняется относительно малая часть поверхности.

При больших энергиях адсорбции на поверхности может быть адсорбировано несколько монослоев. В качестве примера рассчитаем заполнение поверхности бумаги молекулами воды.

Энергия адсорбции воды на бумаге $E_{\text{ад}} = 142 \text{ кДж/моль}$; энергия конденсации $E_{\text{кон}} = 45,2 \text{ кДж/моль}$; $N_{\text{пов}}^{H_2O} = 0,53 \times 10^{19} \text{ м}^{-2}$; масса молекулы воды $m_{H_2O} = 2,992 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$.

Упругость паров воды при температуре 293 К равна $p_{\text{нас}} = 2,337 \cdot 10^3 \text{ Па}$. Расчет проведем для относительной влажности $p/p_{\text{нас}} = 65\%$.

Расчет по формуле (3-18) дает значение $\theta \approx 2,7$, что указывает на полимолекулярную адсорбцию.

При низких давлениях и малых энергиях активации адсорбции время установления равновесия может быть достаточно большим.

Расчет количества адсорбированного газа или заполнения поверхности при постоянном давлении в функции времени может быть осуществлен по уравнению (3-11), которое приводится к виду

$$\frac{d\theta}{\theta - \frac{K_1}{K_2}} = -K_2 dt, \quad (3-21)$$

где

$$K_1 = \frac{\alpha N_u}{N_{\text{пов}}} = \frac{\alpha p}{N_{\text{пов}} \sqrt{2\pi m kT}};$$

$$K_2 = \frac{\alpha N_u}{N_{\text{пов}}} + \frac{1}{t_s} = \frac{\alpha p}{N_{\text{пов}} \sqrt{2\pi m kT}} + \frac{1}{\tau_0 e^{E_{\text{ад}}/R_0 T}}.$$

Решение уравнения (3-21) имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \ln \left(\theta - \frac{K_1}{K_2} \right) &= -K_2 t + \ln C \\ \text{или} \\ \theta - \frac{K_1}{K_2} &= C e^{-K_2 t} \end{aligned} \right\} \quad (3-22)$$

Для адсорбции начальные условия будут при $t=0$; $\theta=0$. С учетом начальных условий и (3-13) получим:

$$\theta = \frac{K_1}{K_2} (1 - e^{-K_2 t}) = \frac{bp}{1 + bp} (1 - e^{-K_2 t}). \quad (3-23)$$

При $t \rightarrow \infty$ уравнение (3-23) превращается в уравнение (3-13). Из уравнения (3-23) можно найти время, за которое достигается степень заполнения поверхности θ :

$$t = \frac{1}{K_2} \ln \frac{1}{1 - \frac{\theta K_2}{K_1}}. \quad (3-24)$$

При расчетах по уравнению (3-24) следует иметь в виду, что значения θ не могут превышать его величину при $t \rightarrow \infty$, определенную по соотношениям (3-13),

(3-17) или (3-18). Так как отношение $K_1/K_2 = \theta_\infty$, то уравнение (3-24) можно записать в виде

$$t = \frac{1}{K_2} \ln \frac{1}{1 - \frac{\theta}{\theta_\infty}}, \quad (3-25)$$

где θ_∞ — заполнение поверхности после длительной экспозиции при заданных условиях.

Можно считать равновесным значением $\theta = 0,99\theta_\infty$. Тогда из уравнения (3-25) получаем время установления адсорбционного равновесия равным:

$$t_{\text{равн}} = \frac{4,6}{K_2} = \frac{4,6}{\frac{\alpha p}{N_{\text{пов}} \sqrt{2\pi m kT}} + \frac{1}{\tau_0 e^{E_{\text{ад}}/R_0 T}}}, \quad (3-26)$$

т. е. при больших давлениях и температурах адсорбционное равновесие устанавливается очень быстро. Так, при температуре 293 К и давлении 10^2 Па адсорбционное равновесие азота на чистой поверхности железа устанавливается примерно за 10^{-10} с [при расчете по формуле (3-26) принято значение $\alpha = 1$ и $\tau_0 = 10^{-13}$ с].

При уменьшении давления в вакуумной системе газ десорбируется с поверхности до тех пор, пока не устанавливается снова динамическое равновесие. Расчет количества десорбирующегося газа можно провести с помощью уравнения (3-22), но при следующих начальных условиях: $t = 0$; $\theta = \theta_0$.

Решение уравнения (3-22) в этом случае имеет вид:

$$\theta = \frac{K_1}{K_2} (1 - e^{-K_2 t}) + \theta_0 e^{-K_2 t}. \quad (3-27)$$

Удельный поток десорбирующегося газа может быть найден после дифференцирования (3-27) и умножения результата на $N_{\text{пов}}$ [72]:

$$q'_{\text{дес}} = N_{\text{пов}} \frac{d\theta}{dt} = N_{\text{пов}} (K_1 - \theta_0 K_2) e^{-K_2 t}. \quad (3-28)$$

Максимальная скорость десорбции будет при $t = 0$ и равна:

$$q'_{\text{дес. макс}} = N_{\text{пов}} (K_1 - \theta_0 K_2). \quad (3-29)$$

Обычно уравнение (3-28) записывается в форме

$$q'_{\text{дес}} = q'_{\text{дес. макс}} e^{-K_2 t}. \quad (3-30)$$

Время, необходимое для достижения скорости десорбции, равной $q'_{\text{дес}}$, можно найти из уравнения (3-28):

$$t = \frac{1}{K_2} \ln \frac{N_{\text{пов}} (K_1 - \theta_0 K_2)}{q'_{\text{дес}}}. \quad (3-31)$$

Следует иметь в виду, что так же, как это нами сделано при составлении уравнений (3-19) и (3-20), для получения значений удельного потока газа необходимо величины, получаемые с помощью уравнений (3-28) — (3-30), умножить на коэффициент $T \cdot 1,384 \cdot 10^{-23}$ для получения значения потока в $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

При расчетах удобнее пользоваться формулой, полученной после логарифмирования уравнения (3-28):

$$\lg q'_{\text{дес}} = A_{\text{дес}} - B_{\text{дес}} t, \quad (3-32)$$

где $A_{\text{дес}}$ и $B_{\text{дес}}$ — постоянные, причем

$$A_{\text{дес}} = \lg N_{\text{пов}} (K_1 - \theta_0 K_2)$$

и

$$B_{\text{дес}} = 0,434 K_2.$$

Необходимо указать, что постоянные коэффициенты K_1 , K_2 , $A_{\text{дес}}$ и $B_{\text{дес}}$ в уравнениях (3-21) — (3-32) зависят от давления над поверхностью материала, которое обычно меняется в зависимости от газовой выделенности в вакуумной системе.

Приведенные теоретические соображения не учитывают целый ряд явлений, происходящих на поверхности твердого тела (выделение газа из твердого тела, взаимодействие молекул разных газов на поверхности твердого тела), и поэтому могут служить главным образом для качественных оценок процессов адсорбции и десорбции.

Для количественных расчетов рекомендуется пользоваться экспериментально найденными значениями коэффициентов $A_{\text{дес}}$ и $B_{\text{дес}}$, которые приведены в приложении 2.

Следует отметить, что данные приложения 2 пригодны лишь для расчетов при комнатных температурах.

Изложенная теория процессов адсорбции и десорбции показывает, что для уменьшения количества адсорбированного на поверхности твердого тела газа следует повышать температуру материала. Это ясно видно из соотношений (3-9) и (3-13). Необходимые для расчета значений t_s величины $E_{\text{ад}}$ для некоторых систем «газ — материал» приведены в табл. 3-2.

Поток газовой выделенной со стенок вакуумной системы может быть найден по формуле

$$Q'_{\text{газ}} = q'_{\text{дес}} A, \quad (3-33)$$

где $q'_{\text{дес}}$ — удельный поток газа, десорбирующегося с единицы площади поверхности стенки вакуумной системы; A — площадь поверхности стенок вакуумной системы.

В случае, если вакуумная полость ограничивается стенками, изготовленными из разных материалов, газовой выделение должно суммироваться из газовой выделений всех элементов, ограничивающих вакуумную систему.

Время, необходимое для достижения заданного давления, проще всего найти графически. Для этого надо построить графики $Q'_{\text{газ}} = f(t)$, найденные по уравнению (3-33). Затем через точку на оси ординат, соответствующую потоку газов, удаляемых вакуумной системой при заданном давлении, провести горизонтальную прямую до пересечения с кривой скорости газовой выделенной. Абсцисса точки пересечения даст время достижения заданного давления.

Пользуясь кривыми $Q'_{\text{газ}} = f(t)$, можно также решить задачу выбора эффективной быстроты откачки вакуумной системы S_0 , исходя из заданного времени достижения определенного давления

Как уже указывалось, расчет по уравнению (3-33) с использованием данных приложения 2 и рис 13-1 и 13-2 позволяет определить время достижения заданного давления при комнатной температуре.

Газовой выделение и время достижения заданного давления при известной энергии адсорбции и температуре можно найти, исходя из уравнений (3-11) и (2-40), причем последнее уравнение записывается с учетом процессов сорбции и десорбции газа и имеет вид:

$$V \frac{dp}{dt} = -S_0 p - \alpha V_1 A p + \frac{Q_1 \theta A}{t_s}, \quad (3-34)$$

где V — откачиваемый объем; p — давление в откачиваемом объеме; S_0 — эффективная быстрота откачки; α — коэффициент прилипания; V_1 — объем газа, падающий на единицу площади в единицу времени [см. (1-37)]; A — площадь стенок откачиваемого объема; Q_1 — количество газа, содержащегося в монослое на единице поверхности; θ — коэффициент заполнения по-

верхности, t_s — время пребывания молекулы на поверхности в адсорбированном состоянии [см. (3-9)]

Уравнение (3-11) запишем в следующей форме:

$$A Q_1 \frac{d\theta}{dt} = \alpha V_1 A p - \frac{Q_1 \theta A}{t_s}. \quad (3-35)$$

Множитель $(1-\theta)$ в этой формуле не учитывают, так как при давлениях, обычно достигаемых в вакуумных системах для физической адсорбции, коэффициент заполнения θ существенно меньше единицы и поэтому $1-\theta \approx 1$

Для определения давления продифференцируем уравнение (3-34) по времени.

$$V \frac{d^2 p}{dt^2} = -S_0 \frac{dp}{dt} - \alpha V_1 A \frac{dp}{dt} + \frac{Q_1 A}{t_s} \frac{d\theta}{dt}. \quad (3-36)$$

Подставляя в уравнение (3-36) значение $A Q_1 \frac{d\theta}{dt}$ из (3-35) и $Q_1 \theta A / t_s$ из уравнения (3-34), получаем:

$$V \frac{d^2 p}{dt^2} = - \left(S_0 + \alpha V_1 A + \frac{V}{t_s} \right) \frac{dp}{dt} - \frac{S_0}{t_s} p. \quad (3-37)$$

Общее решение уравнения (3-37) записывается в форме

$$p = C_1 e^{S_1 t} + C_2 e^{S_2 t}. \quad (3-38)$$

Коэффициенты S_1 и S_2 находятся в соответствии с общими правилами решения дифференциальных линейных уравнений второго порядка:

$$S_{1,2} = - \frac{S_0 + \alpha V_1 A + \frac{V}{t_s}}{2V} \pm \sqrt{\left(S_0 + \alpha V_1 A + \frac{V}{t_s} \right)^2 - 4V \frac{S_0}{t_s}}. \quad (3-39)$$

Используя начальные условия при $t=0$; $p = p_{\text{нач}}$ и

$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_{t=0} = - \frac{S_0 p_{\text{нач}}}{V} - \frac{\alpha V_1 A}{V} p_{\text{нач}} + \frac{Q_1 \theta_0 A}{V t_s}, \quad (3-40)$$

из следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} p_{\text{нач}} &= C_1 + C_2; \\ \left(\frac{dp}{dt} \right)_{t=0} &= C_1 S_1 + C_2 S_2 \end{aligned} \right\} \quad (3-41)$$

находим постоянные интегрирования

$$C_1 = \left(-\frac{S_0 p_{нач}}{V} - \frac{\alpha V_1 A}{V} p_{нач} + \frac{Q_1 b p_{нач} A}{V t_s} - p_{нач} S_2 \right) \frac{1}{S_1 - S_2}; \quad (3-42)$$

$$C_2 = p_{нач} - C_1. \quad (3-43)$$

Обычно произведение $b p_{нач}$ принимается равным θ_0 — начальному значению коэффициента заполнения поверхности.

Уравнение (3-38) позволяет определить длительность откачки до заданного давления.

Связь между $p_{нач}$ и θ_0 может быть найдена из (3-13) или (3-14). Укажем, что при составлении уравнений (3-34) — (3-36) было бы более правильно воспользоваться уравнением (3-11), но при этом будет получено нелинейное дифференциальное уравнение, решение которого в общем виде затруднительно.

В связи с изложенным можно рекомендовать использование уравнения (3-40) только при весьма малых давлениях, когда θ гораздо меньше единицы.

Учитывая, что при определении S_1 приходится иметь дело с разностью близких величин, целесообразно воспользоваться разложением в степенной ряд, что применительно к нашему случаю даст.

$$S_1 = \frac{S_0}{t_s \left(S_0 + \alpha V_1 A + \frac{V}{t_s} \right)} = \frac{V S_0^2}{t_s^2 \left(S_0 + \alpha V_1 A + \frac{V}{t_s} \right)^2}. \quad (3-44)$$

Обычно с достаточной для практических расчетов точностью (примерно 1%) можно считать, что

$$S_2 = - \frac{S_0 + \alpha V_1 A + V/t_s}{V}. \quad (3-45)$$

Как уже отмечалось в § 3-2, фактическая площадь поверхности стенок откачиваемого сосуда может на порядок и более превышать геометрическую площадь поверхности. Это обстоятельство следует учитывать также и при расчетах по формулам (3-42) и (3-43).

Пример 3-1. Определить время, необходимое для откачки камеры с внутренним диаметром 260 мм и высотой 250 мм, изготовленной из малоуглеродистой стали, от давления $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па до давления $6,7 \cdot 10^{-5}$ Па. Суммарная площадь поверхности фторопластовых уплотнителей, обращенных в вакуумную полость, равна

50 см². Эффективная быстрота откачки вакуумной системы при давлении $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па равна $S_0 = 10^{-2}$ м³/с.

В области давлений меньше $6,7 \cdot 10^{-1}$ Па при расчете длительности откачки до заданного давления практически можно пренебречь газом, находящимся в объеме, и следует учитывать лишь необходимость удаления адсорбированного на стенках газа. Связано это с тем, что в мономолекулярном слое адсорбированного газа на каждом квадратном метре поверхности содержится примерно $2 \cdot 10^{-2}$ м³·Па газа (см. табл. 3-1 для H₂O).

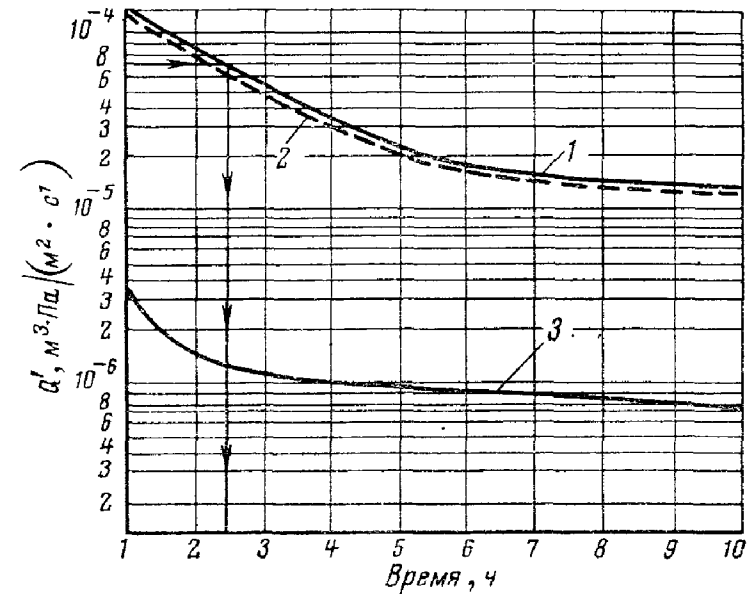


Рис 3-1. Газовыделение вакуумной камеры.

1 — суммарное газовойделение с поверхностей стенок и уплотнителя, 2 — газовойделение с поверхностей стенок камеры, 3 — газовойделение с поверхности уплотнителя, изготовленного из фторопласта

Покажем это следующим простейшим расчетом.

Площадь поверхности металлических стенок камеры будет:

$$A_{мет} = \left(\frac{2\pi \cdot 26^2}{4} + \pi \cdot 26 \cdot 25 \right) 10^4 \approx 0,31 \text{ м}^2.$$

Таким образом, только на металлических поверхностях камеры, если полагать, что истинная поверхность примерно в 3 раза превышает геометрическую (камера полированная), будет находиться следующее количество газа:

$$Q_{мет} = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,31 \cdot 3 = 1,86 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}$$

Объем камеры равен.

$$V = \frac{\pi \cdot 26^2}{4} \cdot 25 \cdot 10^{-6} = 1,33 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3,$$

и при давлении $6,7 \cdot 10^{-1}$ Па в нем сосредоточено

$$Q_V = 6,7 \cdot 10^{-1} \cdot 1,33 \cdot 10^{-2} = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}$$

газа, а удаляется находящийся в объеме газ гораздо быстрее.

Решим задачу графически с использованием кривых удельной скорости газовой выделенности малоуглеродистой стали и фторопласта, приведенных соответственно на рис. 13-1 и 13-2.

Для этого, умножив ординаты кривой на рис. 13-1 на 3100 см^2 и на рис. 13-2 на 50 см^2 , получим кривые, характеризующие скорости газовой выделенности в камере (кривые 2 и 3 на рис. 3-1). Сложим ординаты полученных кривых и построим кривую 1 скорости суммарного газовой выделенности.

Поток газов, удаляемых вакуумной системой, равен:

$$Q' = pS_0 = 6,7 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2} = 6,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$$

Теперь через точку $Q' = 6,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ на оси ординат проведем горизонталь до пересечения с кривой 1 скорости суммарного газовой выделенности. В результате получим, что давление $p = 6,7 \cdot 10^{-3}$ Па будет достигнуто примерно через 2,4 ч.

Пример 3-2. Определить парциальное давление азота в вакуумном объеме диаметром 10 см и высотой 8 см, изготовленном из стали, после охлаждения его от температуры $T_1 = 673 \text{ К}$ до $T_2 = 293 \text{ К}$. При температуре 673 К давление азота составляло $p_{\text{нач}} = 2,7 \cdot 10^{-4}$ Па.

При указанных давлениях изотерма сорбции описывается уравнением (3-14). Энергия физической адсорбции азота на стали (см. табл. 3-2) равна $8,9 \text{ кДж/моль}$, а энергия хемосорбции — 167 кДж/моль .

Сначала рассчитаем давление в объеме после остывания, предполагая наличие лишь физической адсорбции. В этом случае время пребывания молекулы на поверхности будет:

$$t_s = 10^{-13} e^{8900/8,36 \cdot 293} = 3,9 \cdot 10^{-12} \text{ с}$$

Примем коэффициент прилипания $\alpha = 1$. Масса молекулы азота (см. приложение 1) равна $4,652 \cdot 10^{-26}$ кг. Объем равен:

$$V = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} \cdot 8 \cdot 10^{-6} = 6,28 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

Геометрическая поверхность стенок вакуумного объема равна:

$$A_{\text{геом}} = \left(\pi \cdot 10 \cdot 8 + 2 \frac{\pi \cdot 10^2}{4} \right) 10^{-4} \approx 4,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

Обычно для компактных материалов можно считать фактическую или истинную поверхность больше геометрической в 3—8 раз.

Предположим, что в нашем случае это соотношение равно пяти, и тогда площадь внутренней поверхности вакуумного объема равна:

$$A = 4,1 \cdot 10^{-2} \cdot 5 = 2,05 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2$$

Если предположить, что при температуре 673 К весь газ сосредоточен в объеме, то начальная концентрация азота в соответствии с уравнениями (1-9) и (1-24) будет равна:

$$N_{1 \text{ нач}} = p_{\text{нач}} / kT_1$$

Кроме того, используя уравнение (3-14), можно записать:

$$\theta = \frac{N_{\text{пов}}}{N_{1 \text{ пов}}} = \frac{\alpha t_s p}{N_{1 \text{ пов}} \sqrt{2\pi m k T_2}} = \frac{\alpha t_s N_1}{N_{1 \text{ пов}}} \sqrt{\frac{k T_2}{2\pi m}}$$

где $N_{\text{пов}}$ и N_1 — концентрации газа на поверхности и в объеме соответственно после охлаждения стенок.

В результате можно составить следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} N_{\text{пов}} &= \alpha t_s N_1 \sqrt{\frac{k T_2}{2\pi m}}; \\ N_{\text{пов}} A + N_1 V &= N_{1 \text{ нач}} V, \end{aligned} \right\}$$

откуда

$$p = \frac{p_{\text{нач}} V T_2}{A T_1} = \frac{2,7 \cdot 10^{-4} \cdot 6,28 \cdot 10^{-4} \cdot 293}{2,05 \cdot 10^{-1} \cdot 673} = 1,3 \cdot 10^{-12} \sqrt{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{2\pi \cdot 4,652 \cdot 10^{-26}} + \frac{6,28 \cdot 10^{-4}}{2,05 \cdot 10^{-1}}} = 1,16 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \quad (3-46)$$

В случае хемосорбции время пребывания молекулы на поверхности

$$t_s = 10^{-13} e^{167000/8,36 \cdot 293} = 7 \cdot 10^{16} \text{ с}$$

и в соответствии с уравнением (3-46)

$$p = \frac{2,7 \cdot 10^{-4} \cdot 6,28 \cdot 10^{-4} \cdot 293}{2,05 \cdot 10^{-1} \cdot 673} = 4,3 \cdot 10^{-26} \text{ Па}$$

т. е. за счет хемосорбции после остывания давление в сосуде будет пренебрежимо мало.

На практике всегда при остывании происходит некоторое газовой выделение из стенок и давление в сосуде окажется существенно большим, чем получается из расчетов с учетом только сорбционных явлений.

Пример 3-3. Определить время, необходимое для откачки до давления $p = 10^{-7}$ Па стальной цилиндрической камеры диаметром 0,15 м и высотой 0,2 м, предварительно заполненной водородом.

Эффективная быстрота откачки камеры $S_0 = 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и не зависит от давления.

Принимаем коэффициент прилипания $\alpha=0,5$. Кроме того, полагаем, что фактическая поверхность стенок камеры в 10 раз больше геометрической площади поверхности.

Геометрическая площадь поверхности стенок откачиваемой камеры равна $A=0,1296 \text{ м}^2$. Фактическая поверхность стенок камеры будет равна, таким образом, $A_{\text{факт}}=1,296 \text{ м}^2$. Объем камеры $V=3,54 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

Из табл. 3-1 для водорода находим, что $N_{1\text{пов}}=1,52 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-2}$ и $Q_{1\text{пов}}=6,14 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{м}^2$.

Из приложения 1 имеем $M_{\text{H}_2}=2,016$ и $m_{\text{H}_2}=0,3347 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$.

По табл. 3-2 находим, что энергия адсорбции для системы $\text{H}_2\text{—Fe}$ равна $E_{\text{ад}}=134 \text{ кДж}/\text{моль}$.

Принимаем начальный коэффициент заполнения поверхности $\theta_0=1$.

Проведем расчет длительности откачки камеры до заданного давления $p=10^{-7} \text{ Па}$.

Время предварительной откачки до давления, устанавливающегося при $\theta_0=1$, не учитываем ввиду относительной его малости.

1. Рассчитываем длительность откачки при температуре $T=523 \text{ К}$ (250°C).

По формуле (3-9) находим время пребывания молекулы водорода на поверхности в адсорбированном состоянии

$$t_s = 10^{-13} e^{\frac{134 \cdot 10^3}{8,314 \cdot 10^8 \cdot 523}} = 2,6 \text{ с.}$$

По формуле (1-37) определяем объем газа, падающий на единицу площади поверхности:

$$V_1 = 36,38 \sqrt{\frac{523}{2,016}} = 5,87 \cdot 10^2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Находим в соответствии с выражениями (3-13) и (3-14) начальное давление, учтя при этом принятое нами соотношение между фактической и геометрической площадями поверхности стенки камеры и $\theta=1$:

$$p_{\text{нач}} = \frac{1 \cdot 1,52 \cdot 10^{19} \cdot 10 \sqrt{2\pi \cdot 0,3347 \cdot 10^{-26} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 523}}{0,5 \cdot 2,6} = 1,41 \cdot 10^{-3} \text{ Па.}$$

Теперь по формулам (3-44) и (3-45) находим показатели степени в уравнении (3-38):

$$S_1 = - \frac{10^{-3}}{2,6 \left(10^{-3} + 0,5 \cdot 5,87 \cdot 10^2 \cdot 0,1296 + \frac{3,54 \cdot 10^{-3}}{2,6} \right)} - \frac{3,54 \cdot 10^{-3} \cdot (10^{-3})^2}{2,6^2 \left(10^{-3} + 0,5 \cdot 5,87 \cdot 10^2 \cdot 0,1296 + \frac{3,54 \cdot 10^{-3}}{2,6} \right)^2} = 1,01 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1};$$

$$S_2 = - \frac{10^{-3} + 0,5 \cdot 5,87 \cdot 10^2 \cdot 0,1296 + \frac{3,54 \cdot 10^{-3}}{2,6}}{3,54 \cdot 10^{-3}} = 1,075 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

Находим по формулам (3-42) и (3-43) значения постоянных интегрирования:

$$C_1 = \left(- \frac{10^{-3} \cdot 1,41 \cdot 10^{-3}}{3,54 \cdot 10^{-3}} - \frac{0,5 \cdot 5,87 \cdot 10^2 \cdot 0,1296}{3,54 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,41 \cdot 10^{-3} + \frac{6,14 \cdot 10^{-2} \cdot 10 \cdot 0,1296}{3,54 \cdot 10^{-3} \cdot 2,6} - 1,41 \cdot 10^{-3} (-1,075 \cdot 10^4) \right) \times$$

$$\times \frac{1}{-1,01 \cdot 10^{-5} - (-1,075 \cdot 10^4)} = 8,05 \cdot 10^{-4} \text{ Па};$$

$$C_2 = 1,41 \cdot 10^{-3} - 8,05 \cdot 10^{-4} = 6,05 \cdot 10^{-4} \text{ Па.}$$

В результате в соответствии с (3-38) получаем следующее уравнение, характеризующее изменение давления в откачиваемой камере:

$$p = 8,05 \cdot 10^{-4} e^{-1,01 \cdot 10^{-5} t} + 6,05 \cdot 10^{-4} e^{-1,075 \cdot 10^4 t}, \text{ Па.}$$

Таким образом, заданное давление в откачиваемой камере будет достигнуто по истечении времени $t=8,9 \cdot 10^5 \text{ с}=247 \text{ ч}$, т. е. при температуре 250°C для получения заданного давления потребуется более 10 суток непрерывной откачки.

2. Рассчитаем длительность откачки этой же камеры до заданного давления при температуре 623 К (350°C).

При этой температуре время пребывания молекулы водорода на поверхности в адсорбированном состоянии равно:

$$t_s = 10^{-13} e^{\frac{134 \cdot 10^3}{8,314 \cdot 10^8 \cdot 623}} = 1,743 \cdot 10^{-2} \text{ с.}$$

Объем газа, падающего на единицу поверхности, равен:

$$V_1 = 36,38 \sqrt{\frac{623}{2,016}} = 6,39 \cdot 10^2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Начальное давление при температуре камеры 623 К будет равно:

$$p_{\text{нач}} = \frac{1 \cdot 1,52 \cdot 10^{19} \cdot 10 \sqrt{2\pi \cdot 0,3347 \cdot 10^{-26} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 623}}{0,5 \cdot 1,743 \cdot 10^{-2}} = 2,34 \cdot 10^{-1} \text{ Па.}$$

Определяем показатели степени в уравнении (3-38):

$$S_1 = - \frac{10^{-3}}{1,743 \cdot 10^{-2} \left(10^{-3} + 0,5 \cdot 6,39 \cdot 10^2 \cdot 0,1296 + \frac{3,54 \cdot 10^{-3}}{1,743 \cdot 10^{-2}} \right)} - \frac{3,54 \cdot 10^{-3} \cdot (10^{-3})^2}{(1,743 \cdot 10^{-2})^2 \left(10^{-3} + 0,5 \cdot 6,39 \cdot 10^2 \cdot 0,1296 + \frac{3,54 \cdot 10^{-3}}{1,743 \cdot 10^{-2}} \right)^2} = -1,379 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1};$$

$$S_2 = - \frac{10^{-3} + 0,5 \cdot 6,39 \cdot 10^2 \cdot 0,1296 + \frac{3,54 \cdot 10^{-3}}{1,743 \cdot 10^{-2}}}{3,54 \cdot 10^{-3}} = -1,178 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}.$$

РАСТВОРИМОСТЬ, ГАЗСОДЕРЖАНИЕ, ДИФФУЗИЯ,
ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Находим значения постоянных интегрирования:

$$C_1 = \left(-\frac{10^{-3} \cdot 2,34 \cdot 10^{-1}}{3,54 \cdot 10^{-3}} - \frac{0,5 \cdot 6,39 \cdot 10^2 \cdot 0,1296}{3,54 \cdot 10^{-3}} \cdot 2,34 \cdot 10^{-1} + \right. \\ \left. + \frac{6,14 \cdot 10^{-2} \cdot 10 \cdot 1 \cdot 0,1296}{3,54 \cdot 10^{-3} \cdot 1,743 \cdot 10^{-2}} - 2,34 \cdot 10^{-1} (-1,178 \cdot 10^4) \right) \times \\ \times \frac{1}{-1,379 \cdot 10^{-3} - (-1,178 \cdot 10^4)} = 1,11 \cdot 10^{-1} \text{ Па};$$

$$C_2 = 2,34 \cdot 10^{-1} - 1,11 \cdot 10^{-1} = 1,23 \cdot 10^{-1} \text{ Па}.$$

В результате получаем следующее уравнение, характеризующее изменение давления в откачиваемой камере:

$$p = 1,11 \cdot 10^{-1} e^{-1,379 \cdot 10^{-3} t} + 1,23 \cdot 10^{-1} e^{-1,178 \cdot 10^4 t}, \text{ Па}.$$

Таким образом, при температуре 623 К заданное давление будет достигнуто за время $t = 1,079 \cdot 10^4 \text{ с} \approx 3 \text{ ч}$. Данный пример показывает эффективность повышения температуры прогрева сосудов при их откачке. В самом деле, повышение температуры всего на 100°C (с 250 до 350°C) позволило ускорить процесс достижения заданного давления более чем в 80 раз.

Для анализа динамики изменения давления в откачиваемых объемах можно рекомендовать следующее правило:

если частное от деления энергии десорбции на температуру

$$E_{\text{дес}}/T \leq 2 \cdot 10^2 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}),$$

то объем откачивается достаточно быстро;

если частное от деления энергии десорбции на температуру

$$E_{\text{дес}}/T \geq 3 \cdot 10^2 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}),$$

то газы удаляются весьма медленно, но начальное давление в объеме даже при относительно малой эффективной скорости откачки будет незначительным.

Газовыделение с поверхности при повышении температуры сначала растет за счет тепловой десорбции газов, а затем начинает уменьшаться, причем обычно максимум газовыделения приходится на 700—800 К (см. гл. 3).

При дальнейшем повышении температуры газовыделение вновь увеличивается, главным образом за счет выделения газов из толщи материала.

Процессы выделения газов из толщи материалов определяются *растворимостью, проницаемостью и диффузией* и могут быть соответствующим образом рассчитаны. В простейшем случае, когда нет необходимости в определении газовыделения в зависимости от длительности процесса обезгаживания, можно воспользоваться значениями $q_{\text{изд}}$ удельного газовыделения, приведенными в приложениях 3 и 4. Здесь же отметим, что результаты, полученные различными авторами при определении удельного газовыделения, зависят от методики эксперимента и колеблются в широких пределах.

Общее количество газа, выделяющегося из обрабатываемых в вакууме изделий и поступающего в вакуумную систему, можно оценить по формуле

$$Q_{\text{изд}} = G_{\text{изд}} q_{\text{газ}}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па}, \quad (4-1)$$

где $G_{\text{изд}}$ — масса обрабатываемых в вакууме изделий, кг; $q_{\text{газ}}$ — удельное газовыделение из материала обрабатываемых изделий, м³·Па/кг (см. приложение 3).

Поток газов $Q'_{\text{изд}}$, поступающих в вакуумную систему, определяется из выражения

$$Q'_{\text{изд}} = \frac{Q_{\text{изд}} \Omega}{t}, \quad (4-2)$$

где t — длительность процесса вакуумной обработки, с; Ω — коэффициент неравномерности процесса газовыделения во времени, обычно $\Omega = 1,5 \div 3$.

Отметим, что в реальных условиях при постоянной температуре газовыделение меняется больше чем в 1,5—3 раза, и для поддержания газовыделения в ограниченных пределах обычно постепенно повышают температу-

ру, поддерживая давление в вакуумной системе на уровне не выше предела, определяемого условиями проведения технологического процесса.

4-1. РАСТВОРИМОСТЬ И ГАЗСОДЕРЖАНИЕ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Проникновение газов сквозь твердое тело возможно только при условии, что газ сначала адсорбируется на поверхности и затем растворяется в нем. При этом газ в твердом теле перемещается из мест с большей концентрацией в сторону меньшей концентрации.

При достаточно длительной выдержке концентрация газа в твердом теле становится максимально возможной для данных условий (давления газа и температуры твердого тела). В результате раствор газа в твердом теле становится насыщенным. Этим максимальным газосодержанием и определяется *растворимость* газа в твердом теле. Растворимость измеряется объемом газа, растворившегося до насыщения в определенном объеме твердого тела. Единица растворимости $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{м}^3$.

В зависимости от природы газа и твердого тела растворимость колеблется в самых широких пределах.

В неметаллах молекулы газа при растворении не диссоциируют на атомы, и растворимость при постоянной температуре прямо пропорциональна давлению p .

При растворении в металлах молекулы газа диссоциируют на атомы, в связи с чем растворимость пропорциональна \sqrt{p} , где j равно числу атомов в молекуле растворяющегося газа.

Растворимость газа в твердом теле зависит также от температуры, но однозначной зависимости не существует.

Обычно металлы делят на группы в зависимости от характера их взаимодействия с водородом. При этом выделяют четыре группы по виду взаимодействия между водородом и металлами:

- 1) образование гидридов ионного характера (щелочные и щелочноземельные металлы);
- 2) образование ковалентных гидридов (C, Si, S, Se, As, металлы групп IV_B, V_B и VI_B);
- 3) образование истинных растворов (металлы Cu, Ag, Cr, Mo, W, Fe, Co, Ni, Al, Pt);

4) образование псевдогидридов — элементы групп III_A (Ce, La и т. д.), IV_A (Ti, Zr, Th, Hf) и Va (V, Nb, Ta). Заметим, что в Au, Zn, Cd, In и Tl водород вообще не растворяется.

В вакуумной технике наибольшее значение по широте использования имеют металлы 3-й и 4-й групп, которые обычно называют металлами групп А и В соответственно.

Выражение, характеризующее количество растворяющегося в твердом теле газа, имеет вид:

$$s = s_p p^{1/j} e^{\pm \frac{E_p}{jR_0T}}, \quad (4-3)$$

где s_p — константа растворимости; E_p — энергия активации растворимости; p — давление растворяющегося газа над твердым телом; j — коэффициент, зависящий от характера взаимодействия газа с твердым телом, равный единице для систем с молекулярным взаимодействием (неметаллы — газы) и числу атомов в молекуле газов, растворяющихся в твердых телах (обычно металлы), — в атомарном виде; T — температура твердого тела.

Выражение (4-3) удобно использовать в виде

$$\lg s = \lg s_p + \frac{1}{j} \lg p \pm \frac{E_p}{2,303jR_0T}. \quad (4-4)$$

Тогда графически уравнение (4-4) в координатах $\lg s$, $\frac{1}{T}$ для фиксированного значения давления изображается прямой линией, пересекающей ось ординат в точке $\lg s_p + \frac{1}{j} \lg p$ и наклоненной к оси абсцисс под углом, тангенс которого равен $E_p/2,303jR_0$. Обычно даются значения растворимости для давлений 10^5 или 10^2 Па. В тех случаях, когда надо найти значение растворимости при другом давлении p газа, зная растворимость газа при 10^5 Па, надо из известного значения s вычесть величину $\frac{1}{j} \lg 10^5$ и прибавить $\frac{1}{j} \lg p$.

Имея значения растворимости при каких-то двух температурах, можно найти значение растворимости при любой третьей температуре, экстраполируя значение растворимости графически или аналитически в координатах

патах $\lg s$, $\frac{1}{T}$ прямой линией. Однако этот прием можно применять только в случае, если в твердом теле в используемом диапазоне температур не происходят фазовые превращения, при которых могут меняться константы и энергия активации проницаемости.

Значения растворимости для ряда систем «газ — твердое тело» приведены в приложениях 6 и 7.

В металлах группы А, обычно используемых в вакуумной технике в качестве конструкционных материалов, с возрастанием температуры растворимость водорода увеличивается, и, таким образом, в выражениях (4-3) и (4-4) в показателе экспоненты и перед последним слагаемым соответственно стоит знак «минус».

В металлах группы В, применяющихся в вакуумной технике как в качестве конструкционных материалов, так и в качестве газопоглотителей, с возрастанием температуры растворимость водорода уменьшается, и, таким образом, в выражениях (4-3) и (4-4) в показателе экспоненты и перед последним слагаемым стоит знак «плюс».

При комнатной температуре растворимость водорода в металлах группы В на три-четыре порядка больше, чем в металлах группы А, что объясняет применение их в качестве газопоглотителей.

Растворимость азота в металлах обычно меньше, чем водорода. Азот, как и водород, растворяется в атомарном состоянии, причем с увеличением температуры растворимость уменьшается.

Как правило, азот растворяется только в тех металлах, которые могут образовывать нитриды.

Кислород растворяется в металлах в виде окислов, хотя в малых количествах он может образовывать твердые растворы. Растворимость кислорода, как правило, увеличивается с ростом температуры, хотя в некоторых случаях, например в системе «серебро — кислород», при определенной температуре наблюдается минимум растворимости.

Газосодержание представляет собой растворимость в равновесном состоянии, т. е. в случае, когда металл в течение длительного времени выдерживался в условиях, для которых рассчитана растворимость. Это обстоятельство позволяет находить газосодержание, если

известна закономерность изменения растворимости для исследуемой системы «газ — твердое тело».

Прямое экспериментальное определение газосодержания сопряжено со значительными трудностями, так как для определения газосодержания металлы необходимо выдерживать в расплавленном состоянии, а при этом трудно исключить протекание реакции с тиглем и учесть его газовыделение. По этой причине газосодержание определено лишь для немногих материалов. Значения газосодержания для некоторых материалов приведены в приложении 8.

В тех случаях, когда отсутствуют данные по газосодержанию и нельзя воспользоваться значениями растворимости (условия получения металла или его предварительной термической обработки нельзя считать приводящими к равновесному состоянию системы «газ — металл»), используют значения газовыделения, полученные при длительном отжиге образцов (см. приложения 3 и 4).

Газовыделение всегда меньше газосодержания, так как в подавляющем большинстве случаев приблизительно треть газа выделяется только после расплавления. Учитывая это обстоятельство, с приемлемой для инженерных расчетов точностью можно принимать, что газосодержание материала на 25—35% больше его газовыделения.

4-2. ДИФФУЗИЯ И ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГАЗОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Механизм процесса диффузии можно представить как процесс растворения газа в материале со стороны высокого давления с последующим выделением газа на стороне низкого давления. Поэтому очевидно, что растворение должно предшествовать диффузии [3].

В связи с тем, что процессы растворения и диффузии органически связаны между собой, математические выражения для этих процессов имеют схожие закономерности.

Коэффициент диффузии D зависит от температуры твердого тела и свойств системы «твердое тело — газ» следующим образом:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_D}{RT}}, \quad (4-5)$$

где D_0 — константа диффузии; E_d — энергия активации диффузии для данной системы «твердое тело — газ»; R_0 — универсальная газовая постоянная; j — коэффициент, имеющий то же значение, что и в выражении (4-3).

Процессы проницаемости газа сквозь твердое тело описываются законами Фика, которые по структуре подобны законам, описывающим явления теплопроводности. Обычно законы Фика записываются в следующей форме:

$$q' = -D \frac{\partial c}{\partial x}; \quad (4-6)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (4-7)$$

где c — концентрация газа в момент времени t в точке, отстоящей на расстоянии x от начала координат; D — коэффициент диффузии.

Уравнение (4-6) описывает скорость проницаемости газа через единичную площадку при *стационарном* режиме, т. е. в случае, когда концентрации в каждой точке твердого тела во времени неизменны.

Уравнение (4-7) описывает процесс изменения концентрации газа при *нестационарном* режиме как функцию времени.

Если коэффициент диффузии не зависит от концентрации, то уравнения (4-6) и (4-7) будут иметь вид:

$$q' = -D \frac{\partial c}{\partial x}; \quad (4-8)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (4-9)$$

На основании первого закона Фика (4-8) получены выражения, характеризующие проницаемость газов через стенки, разделяющие объемы с разными парциальными давлениями газа.

Если считать градиент концентрации $\partial c / \partial x$ постоянным по толщине стенки, то формулу (4-8) можно записать в виде

$$q' = D \frac{c_0 - c_1}{Z}, \quad (4-10)$$

где Z — толщина стенки; c_0 — объемная концентрация газа в материале у поверхности, соприкасающейся с объемом, в котором газ находится под давлением p ; c_1 — объемная концентрация газа в материале у поверхности, соприкасающейся с объемом, в котором газ находится под давлением p_1 ; D — коэффициент диффузии.

При стационарном процессе концентрация газа в материале зависит от его растворимости, которая в свою очередь пропорциональна давлению газа над поверхностью материала. Так как газ в металлах растворяется, как правило, в атомарном состоянии, а в неметаллических материалах — в молекулярном, то в соответствии с законом действующих масс (законом Фрейндлиха) можно записать в общем виде:

$$c_0 = k_c p^{1/j} \quad \text{и} \quad c_1 = k_c p_1^{1/j}, \quad (4-11)$$

где k_c — коэффициент пропорциональности, значение которого на основании выражения (4-3) равно:

$$k_c = s_p e^{+E_p / R_0 T}, \quad (4-12)$$

где s_p — константа растворимости; E_p — энергия активации растворимости.

В результате получим следующее выражение для удельного потока газа q' через стенку толщиной Z , отнесенного к единице ее поверхности:

$$q' = D \frac{k_c}{Z} (p^{1/j} - p_1^{1/j}), \quad (4-13)$$

где D — коэффициент диффузии.

Проницаемость, или, что то же самое, скорость, удельного газовыделения при стационарном процессе диффузии выражается в тех же единицах, что и поток разреженного газа, отнесенный к единице площади поверхности стенки, разделяющей объемы с разными давлениями.

В выражении (4-13) произведение Dk_c характеризует проницаемость через стенку для данной системы «твердое тело — газ» и может быть заменено коэффициентом проницаемости k_{np} , который также экспоненциально зависит от температуры твердого тела:

$$k_{np} = q_{np} e^{-\frac{E_{np}}{jR_0 T}}, \quad (4-14)$$

где $q_{\text{пр}}$ — константа проницаемости для данной системы «твердое тело — газ», $E_{\text{гф}}$ — энергия активации проницаемости.

Энергия активации проницаемости $E_{\text{пр}}$ мало отличается от энергии активации диффузии $E_{\text{д}}$, если растворимость газов в рассматриваемом материале слабо меняется с температурой. Если $p_1^{1/2} \ll p^{1/2}$, так что практически можно считать $p_1^{1/2} = 0$, то для стенки единичной толщины, учитывая выражения (4-3), (4-12) и (4-13), можно записать:

$$q' = sD, \quad (4-15)$$

где q' — удельный поток газа, проникающего через стенку единичной толщины (проницаемость); s — растворимость; D — коэффициент диффузии.

Соотношение (4-15) позволяет, если известны две величины из трех (коэффициент диффузии и растворимость или проницаемость), получить третью.

Экспериментальные данные по проницаемости обычно приводятся для условий, когда с одной стороны стенка соприкасается с вакуумом и давление p_1 можно принять равным нулю. В этом случае с учетом (4-14) уравнение (4-13) запишется в виде

$$q' = \frac{q_{\text{пр}}}{Z} p^{1/2} e^{-\frac{E_{\text{пр}}}{jR_0T}}. \quad (4-16)$$

Для стенки единичной толщины уравнение (4-16) часто представляют также в виде

$$\lg q' = C_{\text{пр}} + \frac{1}{j} \lg p - \frac{B_{\text{пр}}}{T}, \quad (4-17)$$

где

$$C_{\text{пр}} = \lg q_{\text{пр}}; \quad B_{\text{пр}} \approx \frac{E_{\text{пр}}}{2,303jR_0}.$$

В приложении 10 приведены значения проницаемости q' , найденные для давлений p , равных 10^2 , 10^3 или 10^5 Па. При необходимости определения значения проницаемости для другого давления необходимо произвести пересчет по методике, аналогичной той, что приведена для растворимости. При внешних давлениях существенно ниже атмосферного проницаемость оказывается меньшей, чем это следует из уравнения (4-13), что связано с заполнением адсорбированным газом лишь

части поверхности, которая характеризуется коэффициентом θ , определяемым уравнением (3-1), причем в зависимости от давления, свойств газа и поверхности коэффициент заполнения θ может быть найден из выражений (3-13), (3-16), (3-17) или (3-18). Выражение (4-13) примет соответственно вид.

$$q' = \frac{q_{\text{пр}}}{Z} (\theta_1 p^{1/2} - \theta_2 p_1^{1/2}), \quad (4-18)$$

где θ_1 и θ_2 — коэффициенты заполнения поверхности соответственно при давлениях p и p_1 .

Уравнение (4-16) при малых давлениях p_1 имеет вид

$$q' = \frac{q_{\text{пр}}}{Z} \theta p^{1/2} e^{-\frac{E_{\text{пр}}}{jR_0T}}. \quad (4-19)$$

В тех случаях, когда проницаемость лимитируется сорбцией газа на поверхности твердого тела (при сравнительно низких давлениях), существенное влияние оказывает качество обработки поверхности.

4-3. НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ПРОЦЕСС ДИФфуЗИИ

Нестационарный процесс диффузии наблюдается при обезгаживании материала либо, напротив, при поглощении им газа. Закономерности, характеризующие изменение концентрации газа в рассматриваемом сечении твердого тела со временем, могут быть получены на основании второго закона Фика [уравнение (4-7) или (4-9)].

Решения уравнения (4-9) получаются разными для тел с отличающейся геометрической формой. Обычно в литературе приводятся решения для *плоского полубесконечного тела, бесконечной пластины, бесконечного цилиндра и сферы*.

При необходимости нахождения концентрации в телах более сложной формы их считают состоящими из тел с более простой геометрической формой, для которых известны решения дифференциального уравнения (4-9).

В качестве граничного условия при решении уравнения (4-9) обычно принимают, что на поверхности твердого тела, обращенной в вакуум, давление и концентрация газа сравнительно малы.

В качестве начального условия полагают, что начальная концентрация газа в твердом теле одинакова по всему его объему и существенно выше концентрации газа, соответствующей давлению в вакуумном объеме, а давление и концентрация газа на границе с вакуумным объемом равны нулю, т. е. рассматривается тело со связывающими границами.

Обычно технологов-вакуумщиков интересуют скорости удельного газовойделения или удельного газопоглощения твердых тел, достигнутые в результате проведенной вакуумно-термической обработки.

Поток газа, отнесенный к единице поверхности твердого тела, равен:

$$q' = -D \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (4-20)$$

где q' — удельный поток газа; D — коэффициент диффузии при температуре твердого тела; $\left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0}$ — градиент концентрации газа в твердом теле на его поверхности.

Для нахождения удельного потока газа с поверхности твердого тела по уравнению (4-20) наряду с коэффициентом диффузии D необходимо знать градиент концентрации газа на поверхности твердого тела $\partial c / \partial x$, значение которого зависит от формы детали, давления газа в окружающем пространстве, начальной концентрации газа в твердом теле и т. п.

Математическое выражение, характеризующее зависимость градиента концентрации от перечисленных выше факторов, находят из общего уравнения распределения концентрации по толще твердого тела, вводя различные ограничения, характеризующие геометрию твердого тела и начальное распределение газа в нем [6]. Как правило, при расчетах в качестве начального условия принимается одинаковое значение концентрации газа в твердом теле, равное c_0 .

Обычно рассматриваются два принципиально отличающихся условия:

диффузия в теле со связывающей границей, соответствующая газовойделению из твердого тела (обезгаживанию);

диффузия из постоянного источника, соответствующая поглощению газа твердым телом (геттерированию).

Характер газовойделения зависит от того, какова глубина слоя, в котором значение концентрации газа со временем начинает отличаться от исходного значения. При этом независимо от формы тела для относительно малых глубин обезгаживания (существенно меньших характеристических размеров твердого тела) расчеты можно вести по одной формуле, полученной для полубесконечного твердого тела:

$$c(x, t) = c_0 \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}, \quad (4-21)$$

где $\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \exp(-Z^2) dZ$ — функция нормального распределения Гаусса (интеграл ошибок); Z^2 — дисперсия случайной величины.

Формула (4-21) действительна, если давление на границе твердого тела равно нулю или существенно меньше давления, соответствующего начальной концентрации газа в твердом теле c_0 , определяемого выражением (4-11). В случае, если давлением на поверхности твердого тела нельзя пренебречь, вместо выражения (4-21) следует использовать формулу [72]

$$c(x, t) = c_1 + (c_0 - c_1) \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}, \quad (4-22)$$

где c_1 — концентрация газа на поверхности твердого тела.

По формуле (4-22) можно проводить расчеты не только при обезгаживании материала, но и при поглощении им газа. В этом случае $c_1 > c_0$. Значение градиента концентрации газа на поверхности полубесконечного твердого тела будет равно:

$$\left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{c_0 - c_1}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} \Big|_{x=0} = \frac{c_0 - c_1}{\sqrt{\pi Dt}}. \quad (4-23)$$

Удельный поток газа на основании (4-20) с учетом (4-23) будет:

$$q' = (c_0 - c_1) \sqrt{\frac{D}{\pi t}}. \quad (4-24)$$

Выражением (4-24) можно пользоваться только в случае, если

$$Z, R > \delta, \quad (4-25)$$

где Z, R — характеристический размер твердого тела (толщина пластины, радиус шара или цилиндра); δ — глубина обезгаживания (расстояние от поверхности твердого тела, разделяющее области с уменьшающимся и начальным значениями концентрации).

Условие (4-25) выполняется при сравнительно малых временах обезгаживания, определяемых для пластины уравнением [92]

$$t \leq 0,0244 \frac{Z^2}{D}, \text{ с}, \quad (4-26)$$

где Z — толщина пластины.

Надо иметь в виду, что для $t \rightarrow 0$ уравнение (4-24) дает значение $q' \rightarrow \infty$, что не имеет смысла. Такой результат получается потому, что в граничных условиях сформулированной задачи не учтены сорбционно-десорбционные явления на поверхности твердого тела.

В случае, если условие (4-26) не выполняется, необходимо пользоваться выражениями, полученными на основании решения дифференциального уравнения (4-9) и использования граничных условий, характеризующих геометрию тела. Так, для пластины толщиной Z решение получается в форме

$$c(x, t) = c_1 + \frac{4}{\pi} (c_0 - c_1) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} e^{-\frac{(2k+1)^2 \pi^2 D t}{Z^2}} \sin \frac{(2k+1) \pi}{Z} x, \quad (4-27)$$

где c_1 — концентрация газа на поверхности твердого тела; c_0 — начальная концентрация газа в твердом теле; k — коэффициент, принимающий значения $0, 1, 2, \dots, \infty$; Z — толщина пластины, обезгаживаемой с двух сторон; D — коэффициент диффузии; t — длительность обезгаживания; x — координата точки, в которой определяется концентрация газа ($0 \leq x \leq Z$).

Ряд (4-27) быстро сходится, и если выполняется условие

$$t > 4,5 \cdot 10^{-2} \frac{Z^2}{D}, \text{ с}, \quad (4-28)$$

то можно ограничиться одним первым членом суммы (4-27), делая при этом ошибку, не превышающую 1%:

$$c(x, t) = c_1 + \frac{4}{\pi} (c_0 - c_1) e^{-\frac{\pi^2}{Z^2} D t} \sin \frac{\pi}{Z} x. \quad (4-29)$$

Распределение концентраций газа в твердом теле, описываемое формулой (4-27), представлено на рис. 4-1.

Как видно из рисунка, при длительности обезгаживания $t \approx 0,0244 \frac{Z^2}{D}$ в центре пластины еще остается не-

большая область, в которой концентрация газа равна начальному значению, и, следовательно, при меньших временах расчет газовыделения можно выполнять по формуле (4-23) в соответствии с условием (4-26).

Градиент концентрации газа в пластине при выполнении условия (4-28) будет равен:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{4}{Z} (c_0 - c_1) e^{-\frac{\pi^2}{Z^2} D t} \cos \frac{\pi}{Z} x, \quad (4-30)$$

и градиент концентрации газа на поверхности пластины

$$\left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{4}{Z} (c_0 - c_1) e^{-\frac{\pi^2}{Z^2} D t}. \quad (4-31)$$

В результате удельный поток газа для этого случая равен:

$$q' = \frac{4D (c_0 - c_1)}{Z} e^{-\frac{\pi^2}{Z^2} D t}. \quad (4-32)$$

Процесс диффузии в шаре радиуса R описывается уравнением

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right), \quad (4-33)$$

где r — текущее значение радиуса шара $0 \leq r \leq R$.

Граничные и начальные условия для шара аналогичны граничным условиям для пластины:

$$\text{при } r=0 \quad \frac{\partial c}{\partial r} = 0;$$

$$\text{при } r=R \quad c=c_1;$$

$$\text{при } t=0 \quad c=c_0;$$

$$\text{при } t=\infty \quad c=c_1;$$

Решение уравнения (4-33) имеет вид:

$$c(r, t) = c_1 + \frac{2R(c_0 - c_1)}{r} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{\pi(k+1)} e^{-\frac{(k+1)^2 \pi^2 D}{R^2} t} \sin \frac{\pi(k+1)r}{R}. \quad (4-34)$$

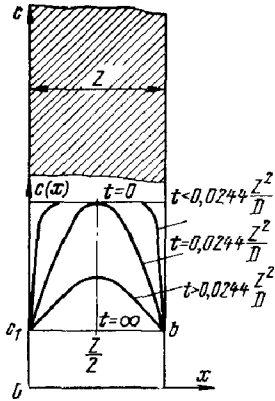


Рис. 4-1. Распределение концентрации газа в пластине, описываемое уравнением (4-27).

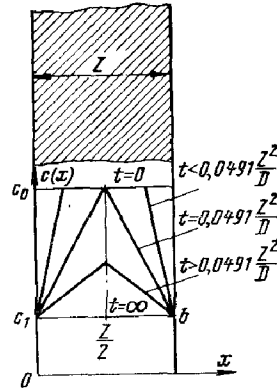


Рис. 4-2. Распределение концентрации газа в пластине, аппроксимированное прямыми линиями.

При выполнении условия $t_i > 0,12 \frac{R^2}{D}$ можно ограничиться первым членом ряда:

$$c(r, t) \approx c_1 + \frac{2R(c_0 - c_1)}{\pi r} e^{-\frac{\pi^2 D}{R^2} t} \sin \frac{\pi r}{R}, \quad (4-35)$$

и градиент концентрации газа будет при этом равен:

$$\frac{\partial c}{\partial r} = \frac{2R(c_0 - c_1)}{\pi} e^{-\frac{\pi^2 D}{R^2} t} \left[\frac{\pi}{rR} \cos \frac{\pi r}{R} - \frac{1}{r^2} \sin \frac{\pi r}{R} \right], \quad (4-36)$$

откуда градиент концентрации на поверхности шара

$$\left. \frac{\partial c}{\partial r} \right|_{r=R} = \frac{2(c_0 - c_1)}{R} e^{-\frac{\pi^2 D}{R^2} t}. \quad (4-37)$$

В итоге удельный поток газа с поверхности шара равен:

$$q' = \frac{2D}{R} (c_0 - c_1) e^{-\frac{\pi^2 D}{R^2} t}. \quad (4-38)$$

Процесс диффузии в цилиндрических телах, длина которых гораздо больше радиуса, описывается дифференциальным уравнением вида

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right). \quad (4-39)$$

Граничные и начальные условия для цилиндра полностью совпадают с граничными и начальными условиями для шара.

Решение уравнения (4-39) имеет вид:

$$c(r, t) = c_1 + (c_0 - c_1) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2J_0 \left(\lambda_k \frac{r}{R} \right)}{\lambda_k J_1(\lambda_k)} e^{-\frac{\lambda_k^2 D}{R^2} t}, \quad (4-40)$$

где J_0 и J_1 — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков;

$$\lambda_1 = 2,4048; \quad \lambda_2 = 5,5201; \quad \lambda_3 = 8,6537 \text{ и т. д.}$$

Проделав действия, аналогичные таковым для шара, получим при выполнении условия $t > 0,15 R^2/D$ следующее выражение для удельного потока газа с поверхности цилиндрических тел:

$$q' \approx \frac{2D(c_0 - c_1)}{R} e^{-\frac{\lambda_1^2 D}{R^2} t}, \quad (4-41)$$

где $\lambda_1 = 2,4048$.

При использовании выражений (4-24), (4-32), (4-38) и (4-41) следует учитывать, что значения коэффициентов диффузии и начальной концентрации, найденные по литературным данным или определенные экспериментально, могут значительно отличаться от фактических, что снижает точность расчетов. В связи с этим с достаточной для практических расчетов точностью (ошибка не более 10%) можно воспользоваться решениями уравнения второго закона Фика, полученными Б. Б. Дейтоном [92] в предположении, что кривая распределения концентрации газа в материале (рис. 4-1) может быть аппроксимирована прямыми линиями (рис. 4-2).

При этом уравнение, характеризующее удельный поток газа q' для полубесконечного твердого тела, имеет вид:

$$q' = \frac{c_0 - c_1}{2} \sqrt{\frac{D}{t}}. \quad (4-42)$$

Для пластины удельный поток газа будет:

$$q' = \frac{2(c_0 - c_1)D}{Z} e^{\frac{\pi}{8} - \frac{8D}{Z^2} t}, \quad (4-43)$$

если

$$t > \frac{\pi Z^2}{64D}, \text{ с}, \quad (4-44)$$

и может быть вычислен по формуле (4-42), если

$$t < \frac{\pi Z^2}{64D}, \text{ с}, \quad (4-45)$$

причем глубина обезгаживания (расстояние от поверхности тела до места, где концентрация газа осталась равной начальному значению c_0) может быть определена по формуле

$$\Delta = 2\sqrt{Dt}. \quad (4-46)$$

Для цилиндра радиуса R удельный поток газа равен:

$$q' = \frac{(c_0 - c_1)D}{R} e^{\frac{\pi}{4} - \frac{6D}{R^2} t}, \quad (4-47)$$

если длительность обезгаживания

$$t > \frac{\pi R^2}{24D}, \text{ с}, \quad (4-48)$$

В случае, если длительность обезгаживания

$$t < \frac{\pi R^2}{24D}, \text{ с}, \quad (4-49)$$

удельный поток газа

$$q' = (c_0 - c_1) \left[\sqrt{\frac{D}{\pi t}} - \frac{D}{2R} \right]. \quad (4-50)$$

Отметим, что к моменту времени

$$t = \frac{\pi R^2}{24D}, \text{ с}, \quad (4-51)$$

из цилиндрического тела удаляется $2/3$ начального газосодержания.

Формулы, полученные в результате линейной аппроксимации, несколько проще точных формул, и их целесообразно применять для определения скорости газосодержания и количества удаленного газа. Вместе с тем определение глубины обезгаживания следует вести по точным формулам, так как при этом разница в результатах может достигать 50% и более.

Для пластины, обезгаживаемой с одной стороны, надо иметь в виду, что по прошествии определенного периода времени процесс обезгаживания перейдет в процесс проникновения газов, описываемый уравнением первого закона Фика (4-6) или (4-8).

Для случая, когда концентрация газа на внешней поверхности пластины равна начальной концентрации газа в материале c_0 , период времени, после которого процесс обезгаживания перейдет в процесс проникновения газа, можно определить по уравнению

$$t = 0,098 \frac{Z^2}{D}, \text{ с}, \quad (4-52)$$

где Z — толщина стенки; D — коэффициент диффузии.

В случае, если стенка, отделяющая вакуумный объем от внешнего пространства, имеет газосодержание c_1 , соответствующее давлению в вакуумном объеме, а начальные и граничные условия равны:

$$\text{при } t=0 \quad c(x, 0) = c_1;$$

$$\text{при } t=\infty \quad c(x, \infty) = \frac{(c_0 - c_1)x}{Z} + c_1;$$

$$\text{при } x=0 \quad \delta(0, t) = c_1;$$

$$\text{при } x=Z \quad c(Z, t) = c_0.$$

Решением уравнения второго закона Фика (4-9) будет:

$$c(x, t) = c_1 + \frac{(c_0 - c_1)x}{Z} + \frac{2(c_0 - c_1)}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k} \sin \frac{k\pi x}{Z} e^{-\frac{\pi^2 k^2 D}{Z^2} t}. \quad (4-53)$$

Удельный поток газа равен:

$$q' = -\frac{D(c_0 - c_1)}{Z} - \frac{2D(c_0 - c_1)}{Z} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k e^{-\frac{\pi^2 k^2 D}{Z^2} t}. \quad (4-54)$$

При больших длительностях процесса нагрева уравнение (4-54) переходит в уравнение (4-10).

Необходимо указать, что газовыделение из металлов по подавляющему большинству газов во время отжига и откачки рассчитывается по уравнению (4-24) и лишь газовыделение водорода приходится определять по уравнениям (4-32), (4-38), (4-41) или (4-43), (4-47), учитывающим конкретную геометрическую форму обрабатываемых деталей.

Пример 4-1. Определить поток азота из пластины из стали 20 толщиной 8 мм и площадью 100 см² через 1800 с выдержки ее при 1273 К (1000°C).

Из приложения 8 находим, что количество азота, содержащегося в стали 20, равно 3,44 (м³·Па)/кг, а из приложения 9 находим значение коэффициента диффузии, который равен:

$$D = 13,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{с}.$$

По формуле (4-26) определим возможность вычисления удельного потока газа по уравнению (4-24):

$$t = 0,0244 \frac{Z^2}{D} = 0,0244 \frac{(8 \cdot 10^{-3})^2}{13,5 \cdot 10^{-12}} = 115\,600 \text{ с} \gg 1800 \text{ с}.$$

Таким образом, расчет следует вести по формуле (4-24). Учитывая сравнительно большое значение начального газосодержания c_0 , газосодержанием на поверхности c_1 пренебрегаем. Учтя также, что плотность материала пластины равна:

$$\rho = 7,85 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3,$$

найдем:

$$q' = 3,7 \cdot 7,85 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{13,5 \cdot 10^{-12}}{\pi \cdot 1800}} \approx 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Поток газов, выделяющийся с поверхности пластины (боковую поверхность не учитываем), будет:

$$Q' = q' A = 1,32 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 2,64 \cdot 11^{-5} (\text{м}^3 \cdot \text{Па})/\text{с}.$$

Подготовку высоковакуумных систем к работе проводят обычно, предварительно нагревая стенки до температур, существенно превышающих рабочие. После охлаждения элементов вакуумных систем до рабочих температур их газовыделение становится намного меньше, чем было до обезгаживания.

То же самое имеет место при откачке электровакуумных приборов, когда добиваются такого значения градиента концентраций газа на поверхностях, ограничивающих вакуумный объем прибора, чтобы в дальней-

шем при рабочих температурах газовыделение было бы меньше поглотительной способности геттера.

Целесообразность обезгаживания при высоких температурах обусловлена экспоненциальным возрастанием коэффициента диффузии при увеличении температуры [см. (4-5)].

Необходимо отметить, что с ростом температуры для металлов группы А (см. § 4-1) имеет место рост растворимости, уменьшающий эффективность обезгаживания, но при достаточно низких внешних давлениях все же оказывается целесообразным для ускорения обезгаживания повышать температуру.

Пример 4-2. Найти, во сколько раз уменьшится скорость газовыделения азота при повышении температуры обезгаживания листовых деталей из малоуглеродистой мягкой стали от 673 до 773 К при одинаковой длительности процесса.

Из приложения 9 находим выражение для коэффициента диффузии

$$D = 1,07 \cdot 10^{-5} e^{-\frac{2,85 \cdot 10^4}{2R_0 T}}$$

В соответствии с (4-5) и (4-24) запишем:

$$\frac{\frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=0, T=673\text{K}}}{\frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=0, T=773\text{K}}} = e^{-\frac{2,85 \cdot 10^4}{2 \cdot 2 \cdot 8,314 \cdot 10^8} \left(\frac{1}{673} - \frac{1}{773} \right)} = \frac{1}{5,3},$$

т. е. при повышении температуры всего на 100 К эффективность обезгаживания возрастает в 5 раз.

С помощью (4-5) и (4-24) можно найти, что

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{D_2}{D_1} = e^{\frac{E_d}{R_0} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}, \quad (4-55)$$

где t_1 и t_2 — длительности обезгаживания при температурах T_1 и T_2 соответственно, необходимые для достижения заданной скорости газовыделения при эксплуатационной температуре.

Как мы видим, сокращение длительности обработки может быть весьма значительным. Так, для случая, приведенного в предыдущем примере, можно сократить длительность обезгаживания более чем в 28 раз.

4-4. СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ДИФфуЗИИ И АДсорбЦИИ НА ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ

В реальных условиях на величину газовыделения влияют как диффузия, так и сорбционно-десорбционные процессы, происходящие на поверхности твердого тела.

Совместное рассмотрение процессов диффузии и адсорбции было дано в [40], где в качестве исходных зависимостей применяют уравнения баланса газов на поверхности твердого тела и в откачиваемом объеме. Уравнение баланса газов в откачиваемом объеме для рассматриваемых условий не будет отличаться от уравнения (3-34) и, таким образом, запишется в виде

$$V \frac{dp}{dt} = -S_0 p - \alpha V_1 A p + \frac{Q_1 \theta A}{t_s} \quad (4-56)$$

Уравнение баланса газов на поверхности твердого тела с учетом потока газа, диффундирующего из толщи металла, будет:

$$A Q_1 \frac{d\theta}{dt} = \alpha V_1 A p - \frac{Q_1 \theta A}{t_s} + DA \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \Big|_{x=0}, \quad (4-57)$$

где V — откачиваемый объем; p — давление в откачиваемом объеме; S_0 — эффективная быстрота откачки; α — коэффициент прилипания; V_1 — объем газа, падающий на единицу площади в единицу времени [см. (1-37)]; A — площадь стенок откачиваемого объема; Q_1 — количество газа, содержащегося в монослое на единице поверхности; θ — коэффициент заполнения поверхности; t_s — время пребывания молекулы на поверхности в адсорбированном состоянии [см. (3-9)]; D — коэффициент диффузии; $(\partial c / \partial x)_{x=0}$ — градиент концентрации газа в металле на его поверхности.

Совместное решение уравнений (4-56) и (4-57) позволяет найти время достижения заданного давления в откачиваемом объеме. Решается эта задача совершенно так же, как это делалось при выводе уравнения (3-34). В результате получаем дифференциальное линейное уравнение второго порядка

$$V \frac{d^2 p}{dt^2} = - \left(S_0 + \alpha V_1 A + \frac{V}{t_s} \right) \frac{dp}{dt} - \frac{S_0}{t_s} p + \frac{D}{t_s} \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \Big|_{x=0}. \quad (4-58)$$

Взаимосвязь плотности адсорбированных атомов и концентрации газа в близлежащем к поверхности слое металла можно определить следующим образом:

$$\theta e^{-\frac{\Delta E}{R_0 T}} = \frac{c(0, t)}{c_0}, \quad (4-59)$$

где ΔE — разница между величинами энергии адсорбированных атомов и атомов газа, находящихся в слое металла; c_0 — начальная концентрация газа в металле.

Решения уравнения (4-58) для некоторых частных случаев, данные в [40], хорошо согласуются с известными экспериментальными зависимостями и позволяют объяснить изменение скорости газовой выделенной, не прибегая к гипотезе о зависимости коэффициента диффузии от концентрации газа в металле.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ДАВЛЕНИЯ ПАРОВ И ДИССОЦИАЦИЯ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Основные технические параметры вакуумной системы и, в частности, предельное (остаточное) давление, достигаемое в ней, определяются не только характеристиками средств откачки, но и в значительной степени давлением паров материалов, из которых изготовлены элементы вакуумной системы, а также состоянием поверхностей, ограничивающих вакуумную полость. Особенно важен правильный выбор материалов при создании сверхвысоковакуумных систем, работающих при повышенных температурах. Решающее значение приобретает знание характеристик испаряемых материалов и в технике получения тонких пленок.

Наличие окисленных поверхностей или растворенных в материале окислов часто является причиной практически неубывающего газовой выделенной в вакуумной системе и невозможности достижения необходимого разрежения. В связи с этим поведение чистых и окисленных материалов при повышенных температурах в вакууме представляет значительный интерес при проектировании и эксплуатации вакуумных систем.

Начнем рассмотрение с испарения металлов и других материалов в вакууме.

5-1. ДАВЛЕНИЯ ПАРОВ МЕТАЛЛОВ

Обычно зависимость давления пара металла от температуры записывается следующим образом:

$$\ln p = A_u - \frac{B_u}{R_0 T}, \quad (5-1)$$

где A_u — коэффициент, зависящий от размерности, в которой дается давление (при давлении, выраженном в паскалях, коэффициент $A_u \approx 11,5$), B_u — изменение свободной энергии.

Вместе с тем для целого ряда материалов получены зависимости давления паров от температуры, выражающиеся гораздо более сложными уравнениями.

В большинстве случаев зависимости давления пара металлов получены исходя из замеров скорости испарения или убыли массы образцов. На основании уравнений (1-8), (1-9), (1-23) и (1-24) удельный поток массы испаряющегося материала будет равен:

$$G_u = \frac{p}{4} \sqrt{\frac{8M}{\pi R_0 T}} = 4,38 \cdot 10^{-3} p \sqrt{\frac{M}{T}}, \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}, \quad (5-2)$$

где p — давление паров металла, Па; M — масса к-моля, кг/к-моль; R_0 — универсальная газовая постоянная, $R_0 = 8,314$ кДж/(к-моль·К); T — температура, К.

В логарифмической форме уравнение (5-2) имеет вид:

$$\lg G_u = -2,368 + \lg p + 0,5 \lg \frac{M}{T}. \quad (5-3)$$

Кривые, характеризующие зависимость давления паров металлов от температуры, даны в приложении 11.

Полезно также помнить следующее правило: при повышении температуры на 5% давление паров и удельный поток массы испаряющегося материала возрастают в 10 раз.

При вычислении давления паров компонентов сплавов обычно используют закон Рауля, хотя он и не всегда дает точные результаты даже в случае твердых растворов.

Согласно закону Рауля давление пара раствора ниже давления пара чистого растворителя на величину, пропорциональную молярной концентрации растворенного вещества. Поскольку обычно один из компонентов раствора имеет существенно меньшее давление пара при данной температуре, то давление пара компонента с большим давлением паров уменьшится пропорционально его молярной доле.

Как правило, состав сплавов задается в массовых процентах, и так как давление паров определяется молярной долей, то расчет отношения давления паров од-

ного из компонентов раствора к давлению этого же вещества в чистом виде выполняется по формуле

$$\frac{p_{A \text{ раств}}}{p_A} = \frac{x_A}{x_A + (100 - x_A) M_A/M_B}, \quad (5-4)$$

где $p_{A \text{ раств}}$ — давление пара компонента А в растворе; p_A — давление пара компонента А в чистом виде; x_A — содержание компонента А в растворе, в массовых %; M_A и M_B — молекулярные (атомные) массы компонентов А и В раствора соответственно.

Расхождение экспериментальных измерений давления паров компонентов сплавов с рассчитанными по уравнению (5-4) объясняется обычно изменением температуры кипения компонентов в сплаве и учитывается введением в уравнение (5-4) коэффициента активности:

$$\frac{p_{A \text{ раств}}}{p_A} = \frac{K_a \cdot x_A}{x_A + (100 - x_A) M_A/M_B}, \quad (5-5)$$

где K_a — коэффициент активности.

Давления паров окислов и других неорганических соединений также зависят от температуры экспоненциально. Давления паров металлов приведены в [28] и приложении 11.

5-2. ТЕРМИЧЕСКАЯ ДИССОЦИАЦИЯ ОКИСЛОВ МЕТАЛЛОВ

Закономерности поведения химических соединений металлов при различных температурах и давлениях оказывают существенное влияние на откачку и последующие характеристики вакуумных систем. Характерным примером является откачиваемый электровакуумный прибор с оксидным катодом, в котором освобождающиеся во время обработки (активировки) катода газы (в том числе кислород) могут взаимодействовать с элементами оболочки прибора, в результате чего образуются окислы.

Наконец, практически всегда металлы, находившиеся даже очень небольшое время на воздухе, покрыты пленками окислов. Таким образом, окислы являются одними из самых распространенных неорганических соединений, а закономерности химических реакций окисления принципиально схожи с реакциями образования нитридов и т. п.

Важнейшей характеристикой реакций окисления — восстановления металлов является давление диссоциации окислов, показывающее направление реакции при данных температуре и давлении кислорода над поверхностью твердого тела (металла).

Выражение, характеризующее давление диссоциации, по структуре аналогично уравнению (5-1) и записывается следующим образом [24]:

$$\ln p_{O_2} = 11,5 + \frac{1}{n_{O_2}} \frac{\Delta F^0}{R_0 T}, \text{ Па}, \quad (5-6)$$

где ΔF^0 — стандартная свободная энергия реакции; n_{O_2} — число молекул O_2 , участвующих в реакции окисления и приходящихся на одну молекулу окисла.

Для двухвалентного металла $n_{O_2} = 0,5$.

Стандартные свободные энергии реакций окисления могут быть с относительно небольшой погрешностью (± 2500 Дж) вычислены с помощью уравнения

$$\Delta F^0 = A_1 + B_1 T, \quad (5-7)$$

где A_1 и B_1 — коэффициенты, значения которых приведены в табл. 5-1 [24].

С использованием (5-7) уравнение (5-6) приобретает вид:

$$\ln p_{O_2} = 11,5 + \frac{B_1}{R_0 n_{O_2}} + \frac{A_1}{R_0 n_{O_2} T}. \quad (5-8)$$

В случае, если при заданной температуре диссоциации давление паров металла соизмеримо с давлением кислорода, выражение (5-6) преобразуется:

$$\ln [p_{\text{мет}}^{n_{\text{мет}}} p_{O_2}^{n_{O_2}}] = 11,5 + \frac{\Delta F^0}{R_0 T} - n_{\text{мет}} \frac{B_1}{R_0 T}, \quad (5-9)$$

где $n_{\text{мет}}$ — число атомов металла, участвующих в реакции; n_{O_2} — число молекул O_2 , участвующих в реакции.

При этом отношение давлений паров металла и кислорода может быть найдено из уравнения

$$p_{\text{мет}} = \frac{n_{\text{мет}}}{n_{O_2}} p_{O_2}. \quad (5-10)$$

Расчеты по уравнениям (5-6) — (5-9), а также экспериментальные данные показывают, что при обычных температурах обезгаживания (600—750 К) вакуумных

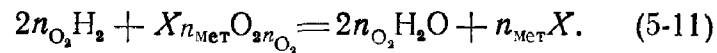
Таблица 5-1

Коэффициенты для вычисления стандартной свободной энергии, ΔF^0 , Дж/моль

Реакция	Температурный интервал, К	$\Delta F^0 = A_1 + B_1 T$		Температурный интервал, К	Реакция	$\Delta F^0 = A_1 + B_1 T$	
		$A_1 \cdot 10^{-3}$	B_1			$A_1 \cdot 10^{-3}$	B_1
$C + 0,5O_2 = CO$	298—2000	-112	-88,2	298—425	$H_2 + 0,5O_2 = H_2O$	-185	225,3
$C + O_2 = CO_2$	298—2000	-394	-1,13	298—1500	$H_2 + 0,5O_2 = H_2O$	-138,6	116,8
$2Cr + 1,5O_2 = Cr_2O_3$	298—1823	-1137	258,7	298—2000	$H_2 + 0,5O_2 = H_2O$	-247	55,95
$2Cr + 1,5O_2 = Cr_2O_2$	1823—2000	-1169	276,0	298—900	$3Fe + 2O_2 = Fe_3O_4$	-1109	321,5
$Co + 0,5O_2 = CoO$	298—2000	-240	78,0	900—1803	$3Fe + 2O_2 = Fe_3O_4$	-1092	298,5
$3Co + 2O_2 = Co_3O_4$	298—1500	-864	346,7	1803—2000	$2Fe + 1,5O_2 = Fe_2O_3$	-1039	269,5
$2Cu + 0,5O_2 = Cu_2O$	298—1357	-166	67,55	298—950	$2Fe + 1,5O_2 = Fe_2O_3$	-819	256,7
$2Cu + 0,5O_2 = Cu_2O$	1357—1502	-181	78,1	950—1179	$2Fe + 1,5O_2 = Fe_2O_3$	-807	244,0
$Cu + 0,5O_2 = CuO$	1502—2000	-119,2	37,3	1179—1800	$Mn + 0,5O_2 = MnO$	-805	243,7
$Cu + 0,5O_2 = CuO$	298—1357	-154,3	85,7	298—1374	$Mn + 0,5O_2 = MnO$	-384,5	73,1
$Cu + 0,5O_2 = CuO$	1357—1720	-156	86,5	1374—1517	$3Be + N_2 = Be_3N_2$	-389	76,4
$Cu + 0,5O_2 = CuO$	1720—2000	-138,5	76,2	1517—2000	$B + 0,5N_2 = BN$	-509	88,3
$3Mn + 2O_2 = Mn_3O_4$	298—1374	-1386	350,5		$3Ca + N_2 = Ca_3N_2$	-559	170,2
$3Mn + 2O_2 = Mn_2O_3$	1374—1517	-1334	349,8		$Ge + 0,5N_2 = GeN$	-110	40,6
$3Mn + 2O_2 = Mn_2O_4$	1517—1800	-1420	372,0			-432	210,0
$2Mn + 1,5O_2 = Mn_2O_3$	298—1517	-989	255,7			-326	104,6
$2Mn + 1,5O_2 = Mn_2O_4$	1517—1700	-958	275,8				
$Mn + O_2 = MnO_2$	298—1030	-520	180,6				
$Hg + 0,5O_2 = HgO$	298—630	-89,9	105,3				
$Hg + 0,5O_2 = HgO$	630—1500	-138,6	184,8				
$Mo + O_2 = MoO_2$	298—2000	-550,5	142,1				
$Ni + 0,5O_2 = NiO$	298—2000	-239,9	92,5				
$2Ag + 0,5O_2 = Ag_2O$	298—2000	-28,1	60,6				
$W + O_2 WO_2 = Ag_2O$	298—1500	-572	171,1				
$Al + 0,5N_2 = AlN$	—	-302	97,5				
$3Ba + N_2 = Ba_3N_2$	1200—2300	-376	239,9				

систем и их элементов давления кислорода для большинства окислов металлов весьма малы, т. е. эти соединения устойчивы и практически не диссоциируют. Исключение, пожалуй, составляют лишь соединения CuO , MnO_2 , Mn_2O_3 и Mn_3O_4 , а также Ag_2O , PdO и HgO .

Восстановление основных окислов металлов может быть осуществлено с помощью водорода, углерода, легко окисляющихся металлов или с помощью других восстановительных сред. В общем виде реакция восстановления окисла металла водородом запишется следующим образом:



Стандартная свободная энергия реакции равна:

$$\Delta F^\circ = 2n_{\text{O}_2}\Delta F^\circ_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta F^\circ_{\text{ок}}. \quad (5-12)$$

где $\Delta F^\circ_{\text{H}_2\text{O}}$ — свободная энергия реакции образования водяного пара; $\Delta F^\circ_{\text{ок}}$ — свободная энергия реакции окисления металла.

Константа равновесия реакции (5-11) равна:

$$K_p = \left[\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}} \right]^{2n_{\text{O}_2}} \quad (5-13)$$

и не зависит от выбора единиц давления и часто обозначается $(\text{H}_2\text{O})/(\text{H}_2)$.

Характерно, что диссоциация Cu_2O при 900 К идет, если давление кислорода меньше примерно $7 \cdot 10^{-8}$ Па, и в то же время Cu_2O восстанавливается водородом при той же температуре, если отношение давления паров воды к давлению водорода меньше $2,83 \cdot 10^5$ [24]. Практически все окислы меди восстанавливаются водородом при температурах около 800 К.

Окислы железа гораздо устойчивее, и поэтому их восстановление водородом до металла возможно лишь при давлениях водорода, превышающих давления паров воды от 2 до 1000 раз.

Никель восстанавливается водородом при $p_{\text{H}_2\text{O}}/p_{\text{H}_2} > > 100$.

Отметим, что хром в водороде с обычным влажосодержанием практически не восстанавливается и реакция восстановления, например, при 1000 К идет лишь в очень сухом водороде ($p_{\text{H}_2\text{O}}/p_{\text{H}_2} < 6,65 \cdot 10^{-6}$).

Определенное значение в вакуумной технике имеют реакции восстановления окислов углеродом, используемые чаще всего с целью обезуглероживания металлов [82]. В этом случае, так же как и при восстановлении окислов водородом, константа равновесия рассчитывается из энергий реакций окисления и образования CO_2 .

Для восстановления какого-либо окисла окисью углерода отношение CO_2/CO должно быть того же порядка, что отношение давлений $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ при восстановлении аналогичного окисла водородом.

Некоторые технологические процессы в вакуумном производстве, например форсированное остывание деталей после их отжига в вакууме, проводят в атмосфере азота, в связи с чем необходимо бывает знать давления диссоциации нитридов. Структура реакции образования нитридов схожа со структурой реакции окисления, и все сказанное о последних может быть отнесено к реакциям образования нитридов. Так, давления диссоциации могут быть также рассчитаны по формулам (5-6) и (5-8).

Отметим, что, несмотря на сравнительно высокие температуры плавления нитридов, давления диссоциации даже самых стойких нитридов при 2000 К превышают $1 \cdot 10^{-4}$ Па. Это обстоятельство ограничивает применение нитридов в качестве тугоплавких материалов в высоковакуумных устройствах.

5-3. СКОРОСТИ РЕАКЦИЙ ДИССОЦИАЦИИ

При рассмотрении процессов диссоциации окислов, нитридов и реакций восстановления важно знать скорости протекания этих реакций, однако термодинамические расчеты и значения констант равновесия не позволяют определить значения скоростей протекания реакций.

Обычно в вакуумных системах реакции идут на поверхностях твердого тела, и скорости их протекания в большинстве случаев определяются скоростями процессов адсорбции и диффузии и практически не зависят от значений констант равновесия.

Однако, несмотря на отсутствие количественных данных о скоростях протекания реакций, знание закономерностей изменения констант равновесия позволяет рационально строить процесс откачки. Так, при откачке электровакуумных приборов через штенгель не имеет смысла форсировать процесс разложения карбонатов оксидного катода за счет повышения температуры, так как из-за малой проводимости откачного штенгеля давление в полости прибора будет относительно высоким, а скорость реакции сравнительно небольшой. В то же время вследствие высоких давлений в полости изделия могут идти обменные процессы и окисление деталей оболочки прибора двуокисью углерода, выделяющейся при разложении карбонатов оксидного катода.

Таким образом, реакция на поверхности твердого тела протекает в несколько стадий, причем скорость реакции определяется наиболее медленно протекающей стадией.

Чаще всего такой лимитирующей стадией является скорость диффузии какого-либо вещества, участвующего в реакции, к месту ее протекания. Рассчитать скорость протекания реакции, т. е. количество реагирующего в единицу времени вещества, в этом случае возможно, если использовать закономерности, полученные в гл. 4.

В случае, если происходит окисление металла, на его поверхности образуется слой окисла, толщина которого увеличивается со временем. Если слой окисла пористый (удельный объем окисла меньше удельного объема соответствующего металла), то скорость развития слоя прямо пропорциональна времени.

В случае плотного слоя (удельный объем окисла больше удельного объема металла) металл должен диффундировать сквозь слой окисла, толщина которого растет пропорционально времени, причем скорость реакции замедляется обратно пропорционально времени взаимодействия, как это происходит при диффузии одного из компонентов из толщи металла к его поверхности, а толщина слоя окисла на поверхности металла увеличивается пропорционально корню квадратному из времени взаимодействия. Методика расчета скорости нарастания слоя окисла приведена в [11].

Скорости протекания реакций в газовой фазе представляют гораздо меньший интерес для вакуумной тех-

ники, в связи с чем мы рассмотрим лишь общие закономерности такого рода реакций.

Прежде всего скорость реакции пропорциональна количеству присутствующих в системе компонентов, причем наблюдаемая скорость реакции оказывается много меньшей числа соударений молекул компонентов реакции между собой, так как далеко не каждое соударение сопровождается взаимодействием молекул.

Скорости реакций между молекулами, находящимися в газовой фазе, существенно возрастают в присутствии катализаторов, которыми могут стать платина, железо, медь и ряд других материалов.

Часть вторая

Расчет вакуумных систем

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПРОВОДИМОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

6.1. ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗА ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ И СОПЛА

Турбулентный и вязкостный режимы течения газа. На основании уравнения Бернулли при адиабатическом процессе истечения газа из большого объема (начальная скорость истечения $u_0=0$) через сужающееся сопло безразмерный расход равен [38]:

$$\frac{M'}{M'_{кр}} = \sqrt{\frac{2}{\kappa-1} \left(\frac{\kappa+1}{2}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \left(\frac{p}{p_{об}}\right)^{\frac{2}{\kappa}} \left[1 - \left(\frac{p}{p_{об}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]}, \quad (6-1)$$

где M' — поток массы; $M'_{кр}$ — критический поток массы (при скорости истечения, равной скорости звука a); скорость звука в идеальном газе

$$a = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\kappa R_0 T / M}, \quad (6-2)$$

где κ — показатель адиабаты; $p_{об}$ — давление газа в объеме; p — противодействие газа.

График безразмерного секундного массового расхода показан на рис. 6-1

Как видно из рис. 6-1, при отношении $\frac{p}{p_{об}} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$

безразмерный массовый расход достигает максимального значения и при дальнейшем уменьшении противодействия остается постоянным. Это явление связано с тем, что при указанном отношении давлений на выходе из сопла достигается скорость звука и в дальнейшем воз-

мущения не могут проникать навстречу потоку, т. е. давление в сечении отверстия равно

$$p_{отв} = p_{об} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

и не зависит более от значения противодействия p .

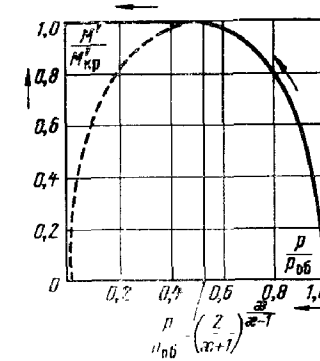


Рис. 6-1. Зависимость безразмерного секундного массового расхода $M'/M'_{кр}$ в функции от $p/p_{об}$.

Если учесть выражение (6-2), то массовый расход для докритического режима $\frac{p}{p_{об}} > \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$ равен:

$$M' = A p_{об} \sqrt{\frac{M}{R_0 T}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left(\frac{p}{p_{об}}\right)^{\frac{2}{\kappa}} \left[1 - \left(\frac{p}{p_{об}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]}, \quad \text{кг/с}, \quad (6-3)$$

и тот же расход в pV -единицах будет:

$$Q' = \frac{M' R_0 T}{M} = A p_{об} \times \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left(\frac{p}{p_{об}}\right)^{\frac{2}{\kappa}} \left[1 - \left(\frac{p}{p_{об}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]}, \quad \text{м}^3 \cdot \text{Па/с}, \quad (6-4)$$

где A — минимальная площадь поперечного сечения сужающегося сопла или отверстия.

Максимально возможный массовый секундный расход будет равен:

$$M'_{\text{макс}} = M'_{\text{кр}} = \rho_{\text{кр}} a A = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} \sqrt{\kappa p_{05} \rho_{05}} A, \text{ кг/с}, \quad (6-5)$$

или

$$M'_{\text{макс}} = A p_{05} \sqrt{\frac{M}{R_0 T}} \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}}, \text{ кг/с}, \quad (6-6)$$

где $\rho_{\text{кр}}$ — плотность газа в потоке при скорости истечения, равной скорости звука a .

Для докритического режима течения газа проводимость отверстия U будет равна:

$$U = \frac{Q'}{p_{05} - p} = \frac{A}{1 - \frac{p}{p_{05}}} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \times \\ \times \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} \left(\frac{p}{p_{05}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} \left[1 - \left(\frac{p}{p_{05}} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-7)$$

Массовый поток в pV -единицах и проводимость отверстия для критического и сверхкритического режимов будут соответственно равны:

$$Q'_{\text{макс}} = A p_{05} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}; \quad (6-8)$$

$$U_{\text{кр}} = \frac{A}{1 - \frac{p}{p_{05}}} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-9)$$

Для воздуха или любого другого двухатомного газа критическое отношение давлений равно:

$$\frac{p}{p_{05}} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = 0,528. \quad (6-10)$$

Соответственно проводимость отверстия U для воздуха при температуре 293 К и докритическом режиме течения ($\frac{p}{p_{05}} > 0,528$) будет:

$$U = \frac{7,66 \cdot 10^2 A}{1 - \frac{p}{p_{05}}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_{05}} \right)^{1,43} \left[1 - \left(\frac{p}{p_{05}} \right)^{0,286} \right]}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6-11)$$

и при сверхкритическом режиме течения ($\frac{p}{p_{05}} < 0,528$)

$$U_{\text{кр}} \approx \frac{200 A}{1 - \frac{p}{p_{05}}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-12)$$

При $p/p_{05} \leq 0,1$ можно считать

$$U_{\text{кр}} \approx 200 A, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-13)$$

Отметим, что даже в случае использования сопла Лаваля, скорость потока газа в выходном сечении которого может превысить скорость звука, максимальный расход все равно определяется выражениями (6-6), (6-8) и (6-10), причем в этих выражениях площадь A берется в минимальном сечении сопла.

Рассмотренные выше выражения при расчетах должны быть умножены на коэффициент $\varphi_{\text{тр}}$, учитывающий потери напора в результате трения:

$$\varphi_{\text{тр}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}}, \quad (6-14)$$

где ξ — коэффициент сопротивления отверстия.

При определении расхода необходимо также учесть коэффициент сжатия струи $\epsilon_{\text{сж}}$, равный:

$$\epsilon_{\text{сж}} = \frac{A_c}{A_0} = \left(\frac{d_c}{d_0} \right)^2, \quad (6-15)$$

где A_c — наименьшая площадь поперечного сечения струи; A_0 — площадь отверстия; d_c — наименьший диаметр струи; d_0 — диаметр отверстия.

Фактический объемный расход через отверстие будет равен:

$$Q'_{\text{об}} = \epsilon_{\text{сж}} A_0 \varphi_{\text{тр}} v_{\text{теор}} = \mu_p A_0 v_{\text{теор}}, \quad (6-16)$$

где $\mu_p = \epsilon_{сж} \Phi_{тр}$ — коэффициент расхода; $v_{теор}$ — скорость истечения, рассчитанная по формуле

$$v_{теор} = \sqrt{\frac{R_0 T}{M} \frac{2\kappa}{\kappa-1} \left(\frac{p}{p_{об}}\right)^{\frac{2}{\kappa}} \left[1 - \left(\frac{p}{p_{об}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]} \quad (6-17)$$

Коэффициенты $\epsilon_{сж}$, $\Phi_{тр}$, ζ и μ_p являются функцией числа Re. При больших числах Re коэффициенты практически не меняются (при $Re \geq 1 \cdot 10^5$ можно принять $\mu_p \approx 0,6$).

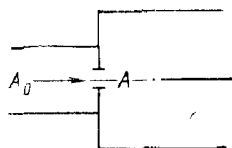


Рис. 6-2. «Большая» диафрагма в трубопроводе. A — площадь отверстия диафрагмы; A_0 — площадь поперечного сечения трубопровода.

В случае истечения газа через насадок-патрубок можно подбором его формы увеличить коэффициент расхода μ_p , приблизив его к единице.

При истечении из сосуда ограниченных размеров коэффициент сжатия струи $\epsilon_{сж}$ оказывается несколько меньшим.

Так, при вязкостном режиме течения газа и размерах диафрагмы, сравнимых с размерами трубопровода (рис. 6-2), т. е. при истечении через «большую» диафрагму, целесообразно вводить поправочный множитель K_A вида [16]

$$K_A = \frac{1}{1 - A/A_0}, \quad (6-18)$$

где A — площадь отверстия диафрагмы; A_0 — площадь поперечного сечения трубопровода, на выходе из которого установлена диафрагма.

Таким образом, с учетом (6-18) для «большой» диафрагмы при вязкостном режиме течения значение ее проводимости целесообразно рассчитывать по формулам

$$U = \frac{A}{1 - \frac{A}{A_0}} \frac{1}{1 - \frac{p}{p_{об}}} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \times \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left(\frac{p}{p_{об}}\right)^{\frac{2}{\kappa}} \left[1 - \left(\frac{p}{p_{об}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]}, \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (6-19)$$

при $\frac{p}{p_{об}} > \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$ и

$$U = \frac{A}{1 - \frac{A}{A_0}} \frac{1}{1 - \frac{p}{p_{об}}} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}}, \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (6-20)$$

при $\frac{p}{p_{об}} < \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$.

Молекулярный режим течения газа. Приведенные выше формулы справедливы до давлений, при которых средняя длина свободного пути становится сравнимой с размерами диафрагмы. При очень низких давлениях молекулы могут приходить к диафрагме без столкновений из любой части сосуда.

На основании уравнений (1-8), (1-37) и (2-2) поток газа через отверстие площадью A равен:

$$Q' = \frac{1}{4} u_n A (p_{об} - p), \quad \text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}, \quad (6-21)$$

и проводимость отверстия

$$U = \frac{1}{4} u_n A = A \sqrt{\frac{R_0 T}{2\pi M}} = 36,4A \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (6-22)$$

где u_n — среднеарифметическая скорость молекул.

Таблица 6-1

Значение коэффициента K в формуле (6-23)

$d/d_{тр}$	K	$d/d_{тр}$	K
0,0	1,000	0,6	1,074
0,1	1,002	0,7	1,107
0,2	1,007	0,8	1,152
0,3	1,017	0,9	1,216
0,4	1,030	1,0	1,333
0,5	1,049		

В случае истечения из сосуда, размеры которого соизмеримы с размерами отверстия (рис. 6-2), следует ввести поправку, с учетом которой проводимость отверстия равна:

$$U = \frac{U_0 K}{1 - A/A_0}, \quad (6-23)$$

где U_0 — проводимость отверстия, рассчитанная по формуле (6-22); A_c — поперечное сечение сосуда; K — поправочный коэффициент, являющийся функцией отношения диаметра отверстия d к диаметру трубопровода $d_{тр}$.

Значения поправочного множителя K приведены в табл. 6-1 [24]. Выражение (6-23) дает ошибку не более 5%.

Молекулярно-вязкостный режим течения газа. Для молекулярно-вязкостного режима течения газа отсутствует выражение, позволяющее сразу получать значение проводимости отверстия. Поэтому для определения проводимости отверстия при молекулярно-вязкостном режиме течения газа воспользуемся следующим искусственным приемом:

а) рассчитаем значение проводимости отверстия $U_{м.отв}$ по формуле (6-22) или (6-23) для молекулярного режима течения газа;

б) рассчитаем значение проводимости отверстия $U_{в.отв}$ по формулам (6-7), (6-9), (6-11) — (6-13), (6-19) или (6-20) для вязкостного режима течения газа;

в) рассчитаем значение проводимости отверстия при молекулярно-вязкостном режиме течения газа $U_{м-в.отв}$ по формуле (6-123), в которую подставим соответственно $U_{в.отв}$ и $U_{м.отв}$. Множитель K_4 рассчитывается по формуле (6-124).

6-2. ТЕЧЕНИЕ ГАЗА ПО ТРУБОПРОВОДАМ

Турбулентный режим течения. При рассмотрении турбулентного режима течения газа обычно принимают распределение скоростей равномерным по сечению потока, хотя в пристеночной области и существует ламинарный подслой [83].

Перепад давления dp на участке трубы длиной dl обычно записывается в форме

$$dp = \zeta \frac{dl}{d} \frac{\rho u_{ср}^2}{2}, \quad (6-24)$$

где d — диаметр трубы; ρ — плотность газа; $u_{ср}$ — средняя скорость, равная $u_{ср} = Q'/A_p$; ζ — коэффициент сопротивления, являющийся функцией числа $Re = \rho u_{ср} d / \eta$.

Наибольшее распространение для расчета коэффициента сопротивления получили формулы Никурадзе [38]

$$\zeta = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}} \quad (6-25)$$

и Блазиуса

$$\zeta = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (6-26)$$

причем формула Никурадзе дает лучшее совпадение с экспериментальными данными в области $Re > 10^5$, а формула (6-26) при $Re < 10^5$, в связи с чем в дальнейшем будем пользоваться последним выражением. Отметим, что при шероховатых и неровных поверхностях трубопроводов числитель в выражении (6-26) увеличивается и для гибких металлических рукавов рекомендуется:

$$\zeta = 0,6/Re^{0,25}. \quad (6-27)$$

Если учесть формулу (6-26) и то, что для цилиндрического трубопровода

$$Q' = Au_{ср}p = \frac{\pi d^2}{4} u_{ср}p, \quad (6-28)$$

а также то, что $\rho = \rho_1 p$, где ρ_1 — плотность газа при давлении 1 Па, то после интегрирования (6-24) получим [75]:

$$Q' = \frac{1,52 \cdot d^{19/7}}{\rho_1^{3/7} \eta^{1/7} l^{4/7}} (p_1^2 - p_2^2)^{4/7}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}, \quad (6-29)$$

где p_1 и p_2 — давления на входе и выходе из трубопровода соответственно; η — коэффициент вязкости газа.

В случае шероховатых трубопроводов числовой множитель в формуле (6-29) уменьшается и для гофрированного металлического трубопровода будет равен 1,05.

На основании выражения (6-29) проводимость гладкого длинного цилиндрического трубопровода при турбулентном режиме течения газа равна:

$$U_T = \frac{1,52}{\rho_1^{3/7} \eta^{1/7}} \frac{d^{19/7}}{l^{4/7}} \frac{(p_1 + p_2)^{4/7}}{(p_1 - p_2)^{3/7}}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (6-30)$$

Выражение (6-30) иногда записывается в несколько иной форме с использованием (1-18), (1-23), (1-30), (1-45):

$$U_{\tau} = \frac{1,57}{\lambda_1^{1/7}} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \frac{d^{19/7}}{l^{4/7}} \frac{(p_1 + p_2)^{4/7}}{(p_1 - p_2)^{3/7}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6-31)$$

где $\lambda_1 = \lambda p$ — длина свободного пути молекулы при давлении 1 Па; T — температура среды в начальном сечении трубопровода.

Формулы (6-30) и (6-31) дают хорошие результаты при длине трубопровода $l \geq 50 d$, так как турбулентный режим течения можно считать установившимся на расстоянии $15 d$ от входного сечения трубопровода.

При расчете проводимости коротких трубопроводов потери на входе можно учесть через сопротивление дросселирования входного отверстия. При этом общее сопротивление короткого трубопровода W_{Σ} будет равно:

$$W_{\Sigma} = W_{\text{тр}} + W_{\text{отв}}, \quad (6-32)$$

где

$$W_{\text{тр}} = 1/U_{\text{тр}} \quad (6-33)$$

— сопротивление трубопровода по длине, причем $U_{\text{тр}}$ рассчитывается по формулам (6-30), (6-31);

$$W_{\text{отв}} = 1/U_{\text{отв}} \quad (6-34)$$

— сопротивление входного отверстия, причем $U_{\text{отв}}$ рассчитывается по формулам (6-7) — (6-13).

Зависимость (6-32) можно использовать только при приближенных расчетах, так как при определении $U_{\text{отв}}$ необходимо учитывать коэффициент расхода μ_p , известный лишь для круглых отверстий и не известный для отверстий другой формы. Наконец, значение коэффициента μ_p не изменяется только при $Re > 10^5$, а при $Re < 10^5$ изменяется с изменением Re , что усложняет расчет.

Кроме того, скорость течения газа нигде не должна превосходить скорости звука.

Обычно с некоторым запасом полагают [75]:

$$u_{\text{ср}} = \frac{Q'}{A p_2} \leq 0,7 a_0, \quad (6-35)$$

где $u_{\text{ср}}$ — средняя скорость течения; Q' — поток газа; A — площадь поперечного сечения трубопровода; p_2 —

давление на выходе из трубопровода; a_0 — скорость звука при параметрах газа на выходе из трубопровода.

Напомним, что верхняя граница давлений, соответствующая $Re \leq 10^5$, при которых справедливы уравнения (6-29) и (6-30), определяются соотношением

$$p_1 \leq p_2 \sqrt{1 + \frac{0,169 a_0^{7/4} p_1^{3/4} \eta^{1/4} l}{d^{5/4} p_2^{1/4}}}. \quad (6-36)$$

Нижняя граница давлений, соответствующая существованию турбулентного режима ($Re = 2200$), может быть найдена из сопоставления выражений (6-28) и (6-29):

$$p_1 \geq \sqrt{p_2^2 + \frac{2,24 \cdot 10^5 \eta^2 l}{\rho_1 d^3}}. \quad (6-37)$$

При отношении давлений по концам трубопровода

$$p_1 = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} p_2 \quad (6-38)$$

скорость газа на выходе из трубопровода может стать равной скорости звука, при этом объемный расход достигнет максимума. При дальнейшем уменьшении противодавления расход Q' и давление p_2 в выходном сечении трубопровода остаются постоянными и могут быть найдены из выражений (6-8) и (6-36), причем при вычислении потока Q' надо в выражение (6-8) подставить вместо $p_{\text{об}}$ величину p_2 , найденную по (6-36).

Проводимость трубопровода при этом определяется по формулам (6-9), (6-12) или (6-13). При откачке воздуха при $t = 293 \text{ К}$ вместо выражений (6-30) и (6-31) получим:

$$U_m = \frac{940 d^{19/7}}{l^{4/7}} \frac{(p_1 + p_2)^{4/7}}{(p_1 - p_2)^{3/7}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-39)$$

Для воздуха при 293 К применяют формулу (6-39), если выполняется неравенство

$$\sqrt{p_2^2 + \frac{6,16 l}{d^3}} \leq p_1 \leq \sqrt{p_2^2 + \frac{0,06 p_2^{7/4} l}{d^{5/4}}}. \quad (6-40)$$

Если известен поток, который в ряде случаев может быть принят равным потоку газа на входе в насос, то по формуле (6-29) можно найти соответствующий перепад давлений на концах трубопровода.

При турбулентном режиме сила трения пропорциональна периметру поперечного сечения трубопровода, поэтому для трубопроводов, имеющих не круглое поперечное сечение, при расчетах вместо d для круглых трубопроводов следует подставлять значение $d_{\text{гидр}}$, определяемое по формуле

$$d_{\text{гидр}} = 2R_{\text{гидр}} = \frac{4A}{\Pi}, \quad (6-41)$$

где A — площадь поперечного сечения; Π — периметр поперечного сечения трубопровода; то же самое относится и к определению числа Re .

Вязкостный режим течения. Рассмотрение условий равновесия слоев движущегося газа при вязкостном режиме течения приводит к параболическому закону распределения скоростей по поперечному сечению потока.

Потери давления на трение по длине трубопровода могут быть определены по формуле

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{трени}} &= p_1 - p_2 = \zeta \frac{l}{d} \frac{\rho u_{\text{ср}}^2}{2} = \\ &= \zeta Re \frac{\eta l u_{\text{ср}}}{2d^2} = 2\zeta Re \frac{\eta l Q'}{\pi d^4 p}, \end{aligned} \quad (6-42)$$

где p_1 и p_2 — давления в начале и в конце трубопровода соответственно; ζ — коэффициент сопротивления по длине, характеризующий потери на трение; $u_{\text{ср}} = \frac{4Q'}{\pi d^2 p}$ — средняя скорость по сечению потока; $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$ — среднее давление в трубопроводе.

Для цилиндрического трубопровода с круглым поперечным сечением

$$\zeta = \frac{64}{Re}. \quad (6-43)$$

С учетом (6-42) потери давления на трение в цилиндрическом трубопроводе с круглым поперечным сечением будут равны:

$$\Delta p_{\text{трени}} = \frac{64\eta l u_{\text{ср}}}{2d^2} = \frac{128\eta l Q'}{\pi p d^4}. \quad (6-44)$$

Текущее значение скорости для цилиндрического трубопровода круглого поперечного сечения определяется выражением

$$u = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} (R^2 - r^2), \quad (6-45)$$

где R — радиус трубопровода; r — значение радиуса, для которого рассчитывается величина скорости.

Используя уравнение (6-44) для цилиндрического трубопровода круглого сечения, можно получить выражение для определения потока газа (уравнение Пуазейля):

$$\begin{aligned} Q' &= \frac{\pi d^4}{128\eta l} (p_1 - p_2) \frac{p_1 + p_2}{2} = \\ &= \frac{\pi d^4}{128\eta l} \frac{(p_1 - p_2)^2}{2}, \quad \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}. \end{aligned} \quad (6-46)$$

Проводимость цилиндрического трубопровода с круглым поперечным сечением равна:

$$U_{\text{в}} = \frac{Q'}{p_1 - p_2} = \frac{\pi d^4}{128\eta l} \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad \text{м}^3 / \text{с}. \quad (6-47)$$

Выражение (6-47) можно привести к несколько иному виду:

$$\begin{aligned} U_{\text{в}} &= 0,0309 \frac{d^4}{\lambda_1 l} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2} = \\ &= 2,82 \frac{d^4}{\lambda_1 l} \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad \text{м}^3 / \text{с}, \end{aligned} \quad (6-48)$$

где λ_1 — длина свободного пути молекулы газа при давлении 1 Па, м.

Для воздуха при 293 К получим:

$$U_{\text{в}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad \text{м}^3 / \text{с}. \quad (6-49)$$

Для канала с прямоугольным сечением (рис. 6-3) поток газа может быть определен по уравнению [38]

$$Q' = \frac{ab^3}{64\eta l} f\left(\frac{a}{b}\right) \frac{p_1^2 - p_2^2}{2}, \quad \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}, \quad (6-50)$$

где

$$\begin{aligned} f\left(\frac{a}{b}\right) &= \frac{16}{3} - \frac{1024}{\pi^5} \frac{b}{a} \left(\text{th} \frac{\pi a}{2b} + \frac{1}{3^3} \text{th} \frac{3\pi a}{2b} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{5^3} \text{th} \frac{5\pi a}{2b} + \dots \right). \end{aligned} \quad (6-51)$$

Значения функции $f\left(\frac{a}{b}\right)$

a/b	1	2	3	5	10	12	100	∞
$f\left(\frac{a}{b}\right)$	2,253	3,664	4,203	4,665	5,00	5,059	5,299	5,333

Значения функции $f\left(\frac{a}{b}\right)$ приведены в табл. 6-2.

Проводимость такого трубопровода равна:

$$\begin{aligned}
 U_B &= \frac{ab^3}{64\eta l} f\left(\frac{a}{b}\right) \frac{p_1 + p_2}{2} = \\
 &= \frac{ab^3}{51\lambda_1 l} f\left(\frac{a}{b}\right) \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2} = \\
 &= \frac{1,79ab^3}{\lambda_1 l} f\left(\frac{a}{b}\right) \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-52)
 \end{aligned}$$

Для воздуха при 293 К проводимость трубопровода *прямоугольного сечения*

$$U_B = 8,65 \cdot 10^2 \frac{ab^3}{l} f\left(\frac{a}{b}\right) \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-53)$$

Для канала с сечением в виде квадрата со стороной a величина потока газа равна:

$$Q' = 3,52 \cdot 10^{-2} \frac{a^4}{\eta l} \frac{p_1^2 - p_2^2}{2}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}. \quad (6-54)$$

Проводимость трубопровода

$$\begin{aligned}
 U_B &= 3,52 \cdot 10^{-2} \frac{a^4}{\eta l} \frac{p_1 + p_2}{2} = 4,42 \cdot 10^{-2} \frac{a^4}{\lambda_1 l} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \times \\
 &\times \frac{p_1 + p_2}{2} = 4,03 \frac{a^4}{\lambda_1 l} \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-55)
 \end{aligned}$$

Для воздуха при 293 К проводимость трубопровода *квадратного сечения*

$$U_B = 1,95 \cdot 10^3 \frac{a^4}{l} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-56)$$

Для канала в виде щели (рис. 6-4) при $b \ll a$ поток газа равен:

$$Q' = 8,33 \cdot 10^{-2} \frac{ab^3}{\eta l} \frac{p_1^2 - p_2^2}{2}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}, \quad (6-57)$$

и проводимость

$$\begin{aligned}
 U_B &= 8,33 \cdot 10^{-2} \frac{ab^3}{\eta l} \frac{p_1 + p_2}{2} = 0,1047 \frac{ab^3}{\lambda_1 l} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \times \\
 &\times \frac{p_1 + p_2}{2} = 9,55 \frac{ab^3}{\lambda_1 l} \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-58)
 \end{aligned}$$

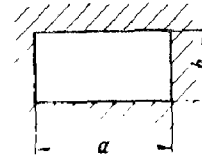


Рис. 6-3. Прямоугольное сечение трубопровода.

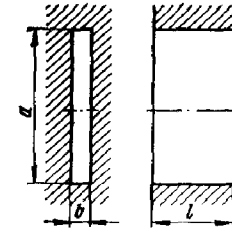


Рис. 6-4. Сечение трубопровода в виде щели.

Для воздуха при 293 К проводимость равна:

$$U_B = 4,6 \cdot 10^3 \frac{ab^3}{l} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-59)$$

В установках со шлюзованием непрерывного действия небольшое натекание газа происходит через щель, одна из стенок которой перемещается в направлении, параллельном направлению течения газа. Для этого случая выражение (6-57) несколько усложнится:

$$Q' = 8,33 \cdot 10^{-2} \frac{ab^3}{\eta l} \frac{p_1^2 - p_2^2}{2} \pm \frac{u_{ст}}{2} ab^3 \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}, \quad (6-60)$$

где $u_{ст}$ — скорость перемещения стенки (если направление перемещения стенки и газа совпадают, то дополнительный член суммируется, в противном случае — вычитается).

Проводимость при этом равна:

$$U_B = 8,33 \cdot 10^{-2} \frac{ab^3}{\eta l} \frac{p_1 + p_2}{2} \pm \frac{u_{ст} ab}{4} \frac{p_1 + p_2}{p_1 - p_2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-61)$$

Для кольцевого цилиндрического канала (рис. 6-5) поток газа равен:

$$Q' = \frac{\pi}{128\eta l} \left[d_1^4 - d_2^4 - \frac{(d_1^2 - d_2^2)^2}{\ln \frac{d_1}{d_2}} \right] \frac{p_1^2 - p_2^2}{2}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}. \quad (6-62)$$

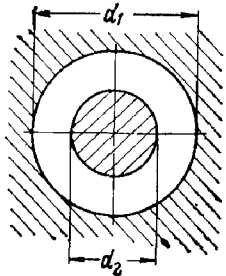


Рис. 6-5. Сечение трубопровода с коаксиально расположенным стержнем.

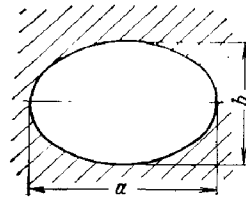


Рис. 6-6. Сечение трубопровода в виде эллипса.

Проводимость такого канала

$$U_B = \frac{\pi}{128\eta l} \left[d_1^4 - d_2^4 - \frac{(d_1^2 - d_2^2)^2}{\ln \frac{d_1}{d_2}} \right] \frac{p_1 + p_2}{2} = \\ = \frac{2,81}{\lambda_1 l} \left[d_1^4 - d_2^4 - \frac{(d_1^2 - d_2^2)^2}{\ln \frac{d_1}{d_2}} \right] \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (6-63)$$

Для воздуха при 293 К проводимость

$$U_B = 1,36 \cdot 10^3 \frac{1}{l} \left[d_1^4 - d_2^4 - \frac{(d_1^2 - d_2^2)^2}{\ln \frac{d_1}{d_2}} \right] \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (6-64)$$

Для цилиндрического трубопровода с эллиптическим сечением (рис. 6-6) поток газа равен:

$$Q' = \frac{\pi}{64} \frac{a^3 b^3}{\eta l (a^2 + b^2)} \frac{p_1^2 - p_2^2}{2}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}. \quad (6-65)$$

Проводимость трубопровода с эллиптическим сечением

$$U_B = \frac{\pi}{64\eta l} \frac{a^3 b^3}{(a^2 + b^2)} \frac{p_1 + p_2}{2} = \\ = 6,18 \cdot 10^{-2} \frac{a^3 b^3}{\lambda_1 l (a^2 + b^2)} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2} = \\ = 5,63 \frac{a^3 b^3}{\lambda_1 l (a^2 + b^2)} \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (6-66)$$

Для воздуха при 293 К проводимость равна:

$$U_B = 2,72 \cdot 10^3 \frac{a^3 b^3}{l (a^2 + b^2)} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (6-67)$$

Для цилиндрического трубопровода с сечением в виде равностороннего треугольника со стороной a поток газа равен:

$$Q' = \frac{\sqrt{3}}{320} \frac{a^4}{\eta l} \frac{p_1^2 - p_2^2}{2}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}. \quad (6-68)$$

Проводимость этого трубопровода

$$U_B = \frac{\sqrt{3}}{320} \frac{a^4}{\eta l} \frac{p_1 + p_2}{2} = 6,8 \cdot 10^{-3} \frac{a^4}{\lambda_1 l} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2} = \\ = 0,62 \frac{a^4}{\lambda_1 l} \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (6-69)$$

Для воздуха при 293 К проводимость трубопровода с сечением в виде равностороннего треугольника

$$U_B = 2,99 \cdot 10^3 \frac{a^4}{l} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (6-70)$$

Для кольцевой щели с радиальным направлением потока газа (рис. 6-7) поток равен:

$$Q' = \frac{\pi}{6} \frac{a^3}{\eta \ln \frac{d_2}{d_1}} \frac{p_1^2 - p_2^2}{2}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}. \quad (6-71)$$

Проводимость щели

$$U_B = \frac{\pi}{6} \frac{a^3}{\eta \ln \frac{d_2}{d_1}} \frac{p_1 + p_2}{2} = 0,658 \frac{a^3}{\lambda_1 \ln \frac{d_2}{d_1}} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2} = \\ = 60 \frac{a^3}{\lambda_1 \ln \frac{d_2}{d_1}} \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (6-72)$$

Для воздуха при 293 К проводимость

$$U_b = 2,89 \cdot 10^4 \frac{a^3}{\ln^2 \frac{d_2}{d_1}} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-73)$$

Для кольцевой цилиндрической щели (рис. 6-8) с отношением $d_1 - d_2/d_1 \ll 1$ и эксцентричным расположением внутреннего цилиндра поток газа равен:

$$Q' = \frac{\pi}{96} \frac{d_2 (d_1 - d_2)^3}{\eta l} \left[1 + \frac{6e^2}{(d_1 - d_2)^2} \right] \frac{p_1^2 - p_2^2}{2}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}. \quad (6-74)$$

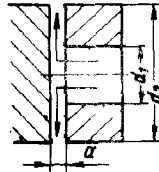


Рис. 6-7. Кольцевая щель постоянной ширины.

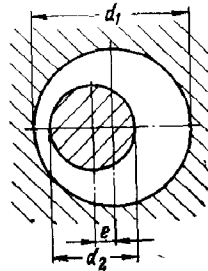


Рис. 6-8. Сечение трубопровода с неаксиально расположенным стержнем.

Проводимость такой щели

$$\begin{aligned} U_b &= \frac{\pi}{96} \frac{d_2 (d_1 - d_2)^3}{\eta l} \left[1 + \frac{6e^2}{(d_1 - d_2)^2} \right] \frac{p_1 + p_2}{2} = \\ &= 4,11 \cdot 10^{-2} \frac{d_2 (d_1 - d_2)^3}{\lambda_1 l} \left[1 + \frac{6e^2}{(d_1 - d_2)^2} \right] \times \\ &\times \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2} = 3,75 \frac{d_2 (d_1 - d_2)^3}{\lambda_1 l} \times \\ &\times \left[1 + \frac{6e^2}{(d_1 - d_2)^2} \right] \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-75) \end{aligned}$$

Для воздуха при 293 К проводимость равна:

$$U_b = 1,81 \cdot 10^3 \frac{d_2 (d_1 - d_2)^3}{l} \left[1 + \frac{6e^2}{(d_1 - d_2)^2} \right] \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-76)$$

Как мы видим, при максимальном значении эксцентриситета проводимость щели в 2,5 раза больше, чем при коаксиальном расположении центрального стержня. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете динамических уплотнений с промежуточной откачкой, так как практически центральный уплотняемый ввод всегда будет касаться в каком-либо месте внешнего цилиндра.

Для цилиндрического трубопровода произвольного поперечного сечения можно найти приближенное значение проводимости, воспользовавшись понятием гидравлического радиуса (6-41). Этот прием можно применить только в случае, если поперечные сечения сравниваемых трубопроводов близки по форме.

Для короткого трубопровода ламинарный режим течения газа устанавливается постепенно, и параболический закон распределения скоростей по поперечному сечению будет наблюдаться лишь на определенном расстоянии от входного сечения трубопровода. Потеря давления на этом начальном участке относительно больше, чем на последующих. Практически увеличение потерь давления на начальном входном участке трубопровода проявляется в некотором снижении потока газа и проводимости трубопровода при том же среднем давлении.

Потери давления на начальном участке трубопровода, длина которого меньше длины, необходимой для формирования параболического распределения скоростей, можно найти по формуле (6-42), если результат увеличить на коэффициент K_1 , больший единицы, учитывающий дополнительное падение давления.

Приближенный расчет ламинарного течения на начальном участке выполнен в [83]. Значения поправочного коэффициента K_1 могут быть найдены по графику на рис. 6-9.

Для цилиндрического трубопровода с круглым сечением и длиной, меньшей длины, необходимой для формирования параболического распределения скоростей,

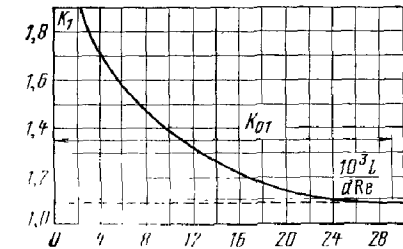


Рис. 6-9. График изменения коэффициента K_1 .

значение потока газа будет найдено с использованием формулы (6-44):

$$Q' = \frac{\pi d^4 \bar{p} \Delta p_{\text{тр}}}{128 \eta l K_1} = \frac{\pi d^4 (p_1^2 - p_2^2)}{256 \eta l K_1}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}, \quad (6-77)$$

где $\bar{p} = (p_1 + p_2)/2$ — среднее давление в трубопроводе; $\Delta p_{\text{тр}} = p_1 - p_2$ — потери давления на трение в трубопроводе; p_1 и p_2 — давления в начале и конце трубопровода соответственно; l и d — длина и диаметр трубопровода; η — коэффициент вязкости газа; K_1 — коэффициент, определяемый по графику на рис. 6-9 в зависимости от отношения l/dRe . Проводимость такого трубопровода будет равна:

$$U_{\text{в}} = \frac{\pi d^4 (p_1 + p_2)}{256 \eta l K_1} = 0,0309 \frac{d^4}{\lambda_1 l K_1} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \frac{(p_1 + p_2)}{2} = \\ = 2,82 \frac{d^4}{\lambda_1 l K_1} \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6-78)$$

где λ_1 — длина свободного пути молекулы газа при давлении 1 Па, м.

Для воздуха при 293 К получим:

$$U_{\text{в}} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l K_1} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-79)$$

Для цилиндрического трубопровода с иной формой сечения и той же длиной, что и в предыдущем случае, при приближенных расчетах можно рекомендовать также использование графика на рис. 6-9 и проведение расчета по формуле, полученной на основании уравнения (6-42). Поток газа для такого трубопровода рассчитывается по следующей формуле:

$$Q' = \frac{\pi d^4}{2 \zeta K_1 Re \eta l} \frac{(p_1^2 - p_2^2)}{2}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}. \quad (6-80)$$

Значение коэффициента сопротивления по длине в формуле (6-42) можно определить из сравнения соответствующих выражений для потока в трубопроводе с круглой и исследуемой формой поперечного сечения, т. е. надо поток или проводимость трубопровода, найденную по формулам (6-50) — (6-76), умножить в K_1 раз.

Параболический закон изменения скорости по сечению трубопровода полностью формируется на следующем расстоянии от входного сечения:

$$l_{\text{нач}} = 0,029 d Re. \quad (6-81)$$

Коэффициент K_1 при длине трубопровода, равной $l_{\text{нач}}$, как видно из графика (рис. 6-9), равен $K_{01} = 1,09$.

С учетом сказанного для цилиндрического трубопровода с круглым сечением и длиной $l > 0,029 d Re$ поток газа равен:

$$Q' = \frac{\pi d^4 (p_1^2 - p_2^2)}{256 \eta l \left[1 + 0,029 (K_{01} - 1) \frac{4m}{\pi \eta k T} \frac{Q'}{l} \right]}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}. \quad (6-82)$$

Проводимость такого трубопровода

$$U_{\text{н}} = \frac{\pi d^4 (p_1 + p_2)}{256 \eta l \left[1 + 0,029 (K_{01} - 1) \frac{4m}{\pi \eta k T} \frac{Q'}{l} \right]} = \\ = \frac{\pi d^4 (p_1 + p_2)}{256 \eta l \left[1 + 0,0104 \frac{m}{\pi \eta k T} \frac{Q'}{l} \right]} = \\ = \frac{0,0155 d^4 \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} (p_1 + p_2)}{\lambda_1 l \left[1 + \frac{4,16 \cdot 10^{-3}}{\lambda_1} \sqrt{\frac{M}{R_0 T}} \frac{Q'}{l} \right]} = \\ = \frac{1,41 d^4 \sqrt{\frac{T}{M}} (p_1 + p_2)}{\lambda_1 l \left[1 + 4,51 \cdot 10^{-5} / \lambda_1 \sqrt{\frac{M}{T}} \frac{Q'}{l} \right]}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-83)$$

Для воздуха при 293 К проводимость трубопровода

$$U_{\text{н}} = \frac{0,68 \cdot 10^3 d^4 (p_1 + p_2)}{l \left[1 + 2,15 \cdot 10^{-5} \frac{Q'}{l} \right]}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-84)$$

Отметим, что по данным ряда исследователей длина начального участка трубопровода $l_{\text{нач}}$ получается иной, чем это рекомендуется по выражению (6-81). Так, по данным [83] эта длина принимается равной:

$$l_{\text{нач}} = 0,065 d Re. \quad (6-85)$$

Для цилиндрического трубопровода с круглым сечением и длиной $l > 0,065 dRe$ поток газа равен:

$$Q' = \frac{\pi d^4 (p_1^2 - p_2^2)}{256 \eta l \left[1 + 0,0729 \frac{m}{\pi \eta k T} \frac{Q'}{l} \right]}, \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}. \quad (6-86)$$

Проводимость трубопровода равна при этом:

$$\begin{aligned} U_B &= \frac{\pi d^4 (p_1 + p_2)}{256 \eta l \left[1 + 0,0729 \frac{m}{\pi \eta k T} \frac{Q'}{l} \right]} = \\ &= \frac{0,0155 d^4 \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} (p_1 + p_2)}{\lambda_1 l \left[1 + \frac{2,92 \cdot 10^{-2}}{\lambda_1} \sqrt{\frac{M}{R_0 T}} \frac{Q'}{l} \right]} = \\ &= \frac{1,41 d^4 \sqrt{\frac{T}{M}} (p_1 + p_2)}{\lambda_1 l \left[1 + \frac{3,17 \cdot 10^{-4}}{\lambda_1} \sqrt{\frac{M}{T}} \frac{Q'}{l} \right]}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (6-87) \end{aligned}$$

Для воздуха при 293 К проводимость

$$U_B = \frac{0,68 \cdot 10^3 d^4 (p_1 + p_2)}{l \left[1 + 1,51 \cdot 10^{-2} Q' / l \right]}, \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (6-88)$$

По нашему мнению, использование данных [83] более целесообразно, несмотря на то, что в [24] используются данные Г. Лангхаара, согласно которым

$$l_{\text{нач}} = 0,113 dRe, \quad (6-89)$$

т. е. практически в реальных вакуумных системах, если руководствоваться соотношениями (6-81), (6-85), имеют дело с «короткими» трубопроводами, так как расчет по формулам (6-46) — (6-76) можно выполнять только при длине трубопровода $l \gg l_{\text{нач}}$.

Сказанное можно пояснить следующим примером.

Если предположить, что течение газа происходит при $Re = 1000$, то длина начального участка трубопровода при использовании зависимостей (6-81) и (6-85) будет в пределах:

$$l_{\text{нач}} = (29 \div 65) d,$$

что примерно в 2—4 раза превышает длину начального участка при турбулентном режиме течения.

При неизвестном Q' расчет по формулам (6-82) — (6-88) ведется методом последовательных приближений до тех пор, пока разница между значением Q' , приня-

тым предварительно, и $Q' = U_B (p_1 - p_2)$ не будет меньше 10%.

Для трубопроводов с другой формой поперечного сечения и длиной $l > 0,065 dRe$ при приближенных расчетах можно рекомендовать при определении потока и проводимости, полученной по формулам (6-50) — (6-76), результат разделить на делитель в квадратных скобках из выражений (6-87), (6-88).

Можно также приближенно учесть потери на входе трубопровода, используя зависимость (6-32) с той разницей, что сопротивление трубопровода по длине $W_{\text{тр}} = l / U_{\text{тр}}$ будет определяться по значениям проводимости, рассчитанным по формулам (6-47) — (6-76).

Молекулярный режим течения. Фундаментальным соотношением для этого режима течения газа в трубопроводах является уравнение Кнудсена:

$$Q' = \frac{4}{3} \cdot \frac{u_a}{l} \int_0^l \frac{\Pi}{A^2} dl (p_1 - p_2), \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}, \quad (6-90)$$

где u_a — средняя арифметическая скорость теплового движения молекул газа; Π — периметр поперечного сечения трубопровода; A — площадь поперечного сечения трубопровода; l — длина трубопровода; p_1 и p_2 — давления на входе и выходе из трубопровода.

подавляющее большинство зависимостей, характеризующих расход и проводимость каналов разных сечений, получено на основании уравнения (6-90). Однако уравнение (6-90) пригодно для каналов с плавным и не очень сильным изменением сечения по длине, а также с формой поперечного сечения, не имеющей острых углов и сужений.

Если использовать значение u_a , уравнение (6-90) можно записать в виде

$$Q' = \frac{191}{3} \sqrt{\frac{T}{M}} \int_0^l \frac{\Pi}{A^2} dl (p_1 - p_2), \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}, \quad (6-91)$$

где T — температура газа, К; M — молекулярная масса газа.

Проводимость такого трубопровода

$$U_m = \frac{194 \sqrt{\frac{T}{M}}}{\int_0^l \frac{\pi}{A^2} dl}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-92)$$

Как видно из (6-92), проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения газа не зависит от давления и определяется только геометрическими размерами трубопровода, что существенно упрощает расчеты. Учитывая это, мы не будем в этом параграфе давать выражения для определения потока газа, а укажем лишь проводимости трубопроводов с различной геометрией. Приведенные зависимости применимы к так называемым длинным трубопроводам ($l \geq 100d$).

Для цилиндрического трубопровода с постоянным поперечным сечением проводимость может быть рассчитана по формуле

$$U_m = 194 \frac{A^2}{\pi l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-93)$$

Уравнение (6-93) является достаточно точным применительно к трубопроводам с круглым поперечным сечением. Для трубопроводов с сечением, отличным от круглого, следует вводить поправочный коэффициент K_2 , и тогда уравнение (6-93) примет вид:

$$U_m = 194 K_2 \frac{A^2}{\pi l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-94)$$

Для воздуха при 293 К проводимость цилиндрического трубопровода постоянного поперечного сечения равна:

$$U_m = 616 K_2 \frac{A^2}{\pi l}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-95)$$

Проводимость длинного конического трубопровода с круглым поперечным сечением

$$U_m = 38,1 \frac{d_1^2 d_2^2}{d_{cp} l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6-96)$$

где d_1 , d_2 и d_{cp} — диаметры трубопровода на концах и в среднем сечении; l — длина трубопровода.

Для воздуха при 293 К проводимость конического трубопровода равна:

$$U_m = 1,21 \cdot 10^2 \frac{d_1^2 d_2^2}{d_{cp} l}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-97)$$

Проводимость цилиндрического трубопровода круглого сечения

$$U_m = 38,1 \frac{d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-98)$$

Для воздуха при 293 К проводимость длинного цилиндрического трубопровода круглого поперечного сечения равна:

$$U_m = 1,21 \cdot 10^2 \frac{d^3}{l}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-99)$$

Проводимость трубопровода с прямоугольным сечением (рис. 6-3) равна:

$$U_m = 97 K_2 \frac{a^2 b^2}{l(a+b)} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6-100)$$

где

$$K_2 = \frac{3}{8} \frac{1 + \frac{b}{a}}{\left(\frac{b}{a}\right)^2} \left\{ \frac{b}{a} \ln \left[\frac{b}{a} + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} \right] + \right. \\ \left. + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}}{\frac{b}{a}} + \frac{1}{3} \left[1 + \left(\frac{b}{a}\right)^3 - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(1 + \frac{b^2}{a^2}\right)^{2/3} \right] \right\}. \quad (6-101)$$

Для воздуха при 293 К проводимость трубопровода с прямоугольным поперечным сечением

$$U_m = 3,08 \cdot 10^2 K_2 \frac{a^2 b^2}{l(a+b)}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-102)$$

Формулы (6-100) и (6-102) применимы при $l \gg a$ и b .

Значения K_2 , подсчитанные по формуле (6-101) для ряда отношений b/a , даны в табл. 6-3.

Таблица 6-3

Значения коэффициента K_2 в уравнении (6-100)

b/a	1	0,667	0,500	0,333	0,200	0,125	0,100
K_2	1,108	1,126	1,151	1,198	1,297	1,400	1,444

Проводимость цилиндрического трубопровода квадратного сечения со стороной a рассчитывается по формуле

$$U_m = 53,7 \frac{a^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-103)$$

Для воздуха при 293 К проводимость трубопровода с квадратным поперечным сечением равна:

$$U_m = 1,71 \cdot 10^2 \frac{a^3}{l}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-104)$$

Проводимость узкой щели (рис. 6-4) при $b \ll a$ по расчетам Клаузинга равна:

$$U_m = 97K_2 \frac{ab^2}{l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-105)$$

где K_2 выбирается из табл. 6-4.

Таблица 6-4

Значения коэффициента K_2 в уравнении (6-105)

l/b	0,1	0,2	0,4	0,8	1	2	3	4	5	10	>10
K_2	0,036	0,068	0,13	0,22	0,26	0,40	0,52	0,60	0,67	0,94	$3/8 \ln l/b$

Для воздуха при 293 К проводимость узкой щели равна:

$$U_m = 3,08 \cdot 10^2 K_2 \frac{ab^2}{l}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-106)$$

Как видно из табл. 6-4, для щели с отношением $l/b > 10$ проводимость равна:

$$U_m = 36,4 \frac{ab^2}{l} \sqrt{\frac{T}{M}} \ln \frac{l}{b}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-107)$$

и для воздуха при 293 К

$$U_m = 1,16 \cdot 10^2 \frac{ab^2}{l} \ln \frac{l}{b}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-108)$$

Выражения (6-105) и (6-106) позволяют рассчитывать проводимость прорезей в тонких стенках, что соответствует малым величинам отношений l/b .

По этим же формулам можно рассчитывать проводимость кольцевой щели при концентричном расположении центрального стержня. При этом вместо a в формулы (6-105) — (6-108) подставляют πd_1 , а вместо $b = \frac{d_1 - d_2}{2}$, где d_1 и d_2 — диаметры наружного цилиндра и стержня соответственно.

Учитывая, что в реальных условиях центральный стержень практически никогда не бывает соосен с внешней стенкой канала, для расчета проводимости в этом случае можно рекомендовать формулу

$$U_m = 76,2K_2 \frac{d_1 (d_1 - d_2)^2}{l} \sqrt{\frac{T}{M_1}} \left(1 + \frac{2e^2}{(d_1 - d_2)^2} \right), \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-109)$$

где e — эксцентриситет центрального стержня; K_2 — поправочный коэффициент, выбираемый по табл. 6-4 в зависимости от отношения $2l/d_1 - d_2 = l/b$.

Для воздуха при 293 К получим:

$$U_m = 2,42 \cdot 10^2 K_2 \frac{d_1 (d_1 - d_2)^2}{l} \left(1 + \frac{2e^2}{(d_1 - d_2)^2} \right), \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-110)$$

В предельном случае, когда эксцентриситет $e = \frac{d_1 - d_2}{2}$, проводимость кольцевой щели возрастает по сравнению со случаем концентричного расположения стержня всего на 50%, т. е. гораздо меньше, чем при вязкостном режиме течения газа [см. (6-75)].

Проводимость кольцевой щели постоянной ширины (рис. 6-7) с радиальным направлением потока газа равна:

$$U_m = 114 \left(\frac{1}{2} + \ln \frac{d_2 - d_1}{2a} \right) \left(\frac{a^2 (d_1 + d_2)}{d_2 - d_1} \right) \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (6-111)$$

Для воздуха при 293 К проводимость такой щели равна:

$$U_m = 3,63 \cdot 10^2 \left(\frac{1}{2} + \ln \frac{d_2 - d_1}{2a} \right) \frac{a^2 (d_1 + d_2)}{d_2 - d_1}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (6-112)$$

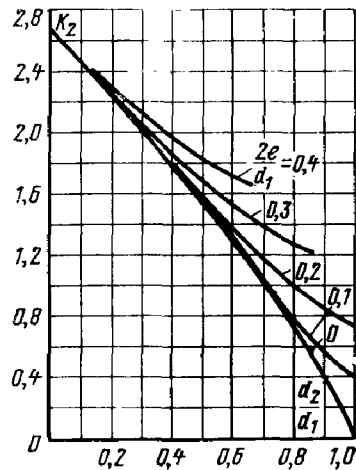


Рис. 6-10. Поправочный коэффициент K_2 в уравнении (6-113).

Эта формула тем точнее, чем сильнее неравенства

$$\frac{d_1 + d_2}{d_2 - d_1} \gg 1 \text{ и } \frac{d_2 - d_1}{a} \gg 1.$$

Проводимость цилиндрического трубопровода с неаксиально расположенным стержнем (рис. 6-8) равна [75]:

$$U_m = 14,3K_2 \frac{d_1^3 \left(1 - \frac{d_2^2}{d_1^2} \right)}{l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (6-113)$$

где K_2 берется по кривым на рис. 6-10.

Для воздуха при 293 К

$$U_m = 45,4K_2 \frac{d_1^3 \left(1 - \frac{d_2^2}{d_1^2} \right)}{l}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (6-114)$$

Эта формула справедлива и при эксцентриситете $e=0$.

Проводимость цилиндрического трубопровода с коаксиально расположенным стержнем (рис. 6-5) равна:

$$U_m = 38,1 \frac{(d_1 - d_2)^2 (d_1 + d_2)}{l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (6-115)$$

Для воздуха при 293 К проводимость цилиндрического трубопровода с коаксиально расположенным стержнем равна:

$$U_m = 1,21 \cdot 10^2 \frac{(d_1 - d_2)^2 (d_1 + d_2)}{l}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (6-116)$$

Проводимость цилиндрического трубопровода с эллиптическим сечением (рис. 6-6) равна:

$$U_m = 53,7 \frac{a^2 b^2}{l \sqrt{a^2 + b^2}} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (6-117)$$

Для воздуха при 293 К проводимость трубопровода эллиптического сечения равна:

$$U_m = 1,71 \cdot 10^2 \frac{a^2 b^2}{l \sqrt{a^2 + b^2}}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (6-118)$$

Формулы (6-117) и (6-118) могут применяться только при относительно малой разнице размеров осей эллипса, так как получены формально из основной формулы Кнудсена и не имеют поправочного множителя.

Проводимость цилиндрического трубопровода с сечением в виде равностороннего треугольника со стороной a равна:

$$U_m = 15,1 \frac{a^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (6-119)$$

и для воздуха при 293 К

$$U_m = 48,1 \frac{a^3}{l}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (6-120)$$

Проводимость цилиндрических трубопроводов с формой поперечного сечения, отличающейся от рассмотренных выше, можно найти, подбирая наиболее близкие сечения или используя комбинацию из нескольких сечений, проводимости которых известны, и суммируя значения их проводимостей. Обычно при этом удается делать расчеты с погрешностью не более 10—20%.

Приведенные выше соотношения для расчета проводимостей при молекулярном режиме течения газа дают точность до 5% при соотношении длины и определяющего размера поперечного сечения трубопровода, например диаметра для круглого сечения, не менее 100.

Таким образом, формулы (6-92) — (6-120) пригодны для расчетов проводимостей длинных трубопроводов. Исключение составляют лишь формулы (6-105) — (6-108) при отношении $l/b < 10$, так как такие трубопроводы (щели) можно считать относительно короткими трубопроводами. При длинах трубопроводов, меньших 100 определяющих размеров, следует вводить поправки.

Таблица 6-5

Поправочный коэффициент K_3 в уравнении (6-121)

l/d	K_3	l/d	K_3	l/d	K_3
0	1	0,85	0,5518	4,0	0,2316
0,05	0,9524	0,90	0,5384	4,5	0,2131
0,10	0,9092	0,95	0,5256	5,0	0,1973
0,15	0,8699	1,00	0,5136	6,0	0,1719
0,20	0,8341	1,1	0,4914	7,0	0,1523
0,25	0,8013	1,2	0,4711	8,0	0,1367
0,30	0,7711	1,3	0,4527	9,0	0,1240
0,35	0,7434	1,4	0,4359	10,0	0,1135
0,40	0,7177	1,5	0,4205	15	0,0797
0,45	0,6940	1,6	0,4062	20	0,0613
0,50	0,6710	1,7	0,3934	25	0,0499
0,55	0,6514	1,8	0,3809	30	0,0420
0,60	0,6320	1,9	0,3695	35	0,0363
0,65	0,6139	2,0	0,3589	40	0,0319
0,70	0,5970	2,5	0,3146	45	0,0285
0,75	0,5810	3,0	0,2807	50	0,0258
0,80	0,5659	3,5	0,2537	500	0,002658
				Более 500	$4/3 d/l$

Проводимость коротких цилиндрических трубопроводов проще всего рассчитывать, пользуясь формулой (6-32). При этом значения проводимостей трубопровода U_m берутся по формулам (6-92) — (6-120), а проводимости отверстий по формулам (6-22) и (6-23).

Гораздо более точные результаты получаются при использовании формул, учитывающих сопротивление входного отверстия.

Наилучшие результаты для цилиндрических трубопроводов круглого сечения получаются при использова-

нии формулы Клаузинга, которая представляет собой уравнение (6-22) с поправочным множителем, являющимся функцией отношения l/d :

$$U_m = 36,4 K_3 A \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6-121)$$

где K_3 — поправочный множитель, значения которого берутся по табл. 6-5.

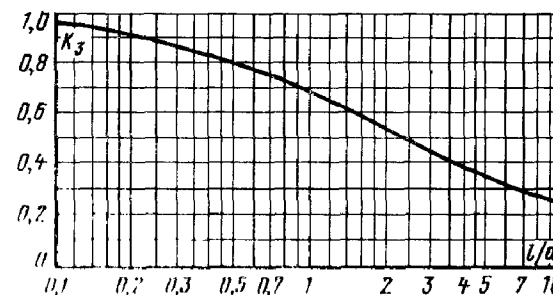


Рис. 6-11 Поправочный коэффициент K_3 в уравнении (6-121)

Для воздуха при 293 К проводимость цилиндрического трубопровода круглого сечения *любой* длины равна.

$$U_m = 1,16 \cdot 10^2 K_3 \frac{\pi d^2}{4}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-122)$$

Формула (6-121) может быть применена также для вычисления проводимости цилиндрического канала прямоугольного сечения, но при этом значения поправочного множителя K_3 следует брать по графику на рис. 6-11.

Молекулярно-вязкостный режим течения газа. Полный переход от вязкостного режима к молекулярному режиму занимает интервал давлений примерно в два порядка, причем в этой области приведенные выше соотношения как для вязкостного, так и для молекулярного режимов неприменимы.

Принципиальное отличие молекулярно-вязкостного режима от вязкостного заключается в том, что у стенок трубопровода скорость течения газа не равна нулю.

Что же касается соотношений для молекулярного режима течения газа, то они не могут применяться

в промежуточной области, так как не учитывают влияния изменяющегося давления.

Полученные для молекулярно-вязкостного режима течения газа теоретические зависимости, учитывающие явление скольжения, дают весьма значительные отклонения от результатов экспериментов. Наилучшим образом отвечает экспериментальным данным уравнение Кнудсена, который вывел его по результатам обработки большого числа экспериментов, проведенных на цилиндрических трубопроводах круглого сечения.

Кнудсен представил значение проводимости цилиндрического трубопровода как сумму значений проводимости этого трубопровода при заданном давлении, полученном по уравнению (6-47), и проводимости этого же трубопровода при молекулярном режиме течения, полученном по уравнению (6-98), умноженной на поправочный множитель. Таким образом, уравнение Кнудсена записывается следующим образом:

$$U_{м-в} = U_{в} + K_4 U_{м}, \quad (6-123)$$

где K_4 — коэффициент, учитывающий среднее давление в трубопроводе и равный:

$$K_4 = \frac{1 + \frac{d}{\eta} \sqrt{\frac{M}{R_0 T}} \frac{p_1 + p_2}{2}}{1 + 1,24 \frac{d}{\eta} \sqrt{\frac{M}{R_0 T}} \frac{p_1 + p_2}{2}}. \quad (6-124)$$

Проводимость длинного цилиндрического трубопровода круглого сечения равна

$$U_{м-в} = \frac{\pi d^3}{128 \eta l} \frac{p_1 + p_2}{2} + \left(\frac{1 + \frac{d}{\eta} \sqrt{\frac{M}{R_0 T}} \frac{p_1 + p_2}{2}}{1 + 1,24 \frac{d}{\eta} \sqrt{\frac{M}{R_0 T}} \frac{p_1 + p_2}{2}} \right) \times 38,1 \frac{d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6-125)$$

или в несколько иной форме

$$U_{м-в} = 2,82 \frac{d^3}{\lambda_1 l} \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2} + \left(\frac{1 + 1,254 \frac{d}{\lambda_1} \frac{p_1 + p_2}{2}}{1 + 1,551 \frac{d}{\lambda_1} \frac{p_1 + p_2}{2}} \right) \times 38,1 \frac{d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6-126)$$

где λ_1 — длина свободного пути молекулы газа при давлении 1 Па.

Для воздуха при 293 К получим:

$$U_{м-в} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^3}{l} \frac{p_1 + p_2}{2} + \left(\frac{1 + 1,9 \cdot 10^4 d \frac{p_1 + p_2}{2}}{1 + 2,35 \cdot 10^4 d \frac{p_1 + p_2}{2}} \right) \times 1,21 \cdot 10^2 \frac{d^3}{l}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-127)$$

Анализ уравнения (6-126) показывает, что при давлениях, близких к верхней границе молекулярно-вязкостного режима, K_4 стремится к пределу, равному 0,81. Влияние второго слагаемого при этом становится незначительным. При давлениях, близких к нижней границе молекулярно-вязкостного режима, K_4 стремится к 1 и, напротив, влияние первого слагаемого становится незначительным.

Проводимость узкой кольцевой щели постоянной ширины с радиальным направлением потока газа (рис. 6-7) равна [75]:

$$U_{м-в} = \frac{\pi}{6\eta} \frac{a^3}{\ln d_2/d_1} \frac{p_1 + p_2}{2} + \pi \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \frac{a^2}{\ln d_2/d_1} + 0,12 \ln \left(\frac{\frac{2\lambda_1}{a(p_1 + p_2)} + 1,5}{\frac{4\lambda_1}{(d_2 - d_1)(p_1 + p_2)} + 1,5} \right) = \frac{59,9a^3}{\lambda_1 \ln d_2/d_1} \times \times \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{p_1 + p_2}{2} + 2,87 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{a^2}{\ln d_2/d_1} + 0,12 \ln \left(\frac{\frac{2\lambda_1}{a(p_1 + p_2)} + 1,5}{\frac{4\lambda_1}{(d_2 - d_1)(p_1 + p_2)} + 1,5} \right), \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-128)$$

Для воздуха при 293 К для кольцевой щели с радиальным направлением потока газа проводимость равна:

$$U_{м-в} = \frac{2,89 \cdot 10^4 a^3}{\ln d_2/d_1} \frac{p_1 + p_2}{2} + 9,12 \cdot 10^2 \frac{a^2}{\ln d_2/d_1} + 0,12 \ln \left(\frac{\frac{13,2 \cdot 10^{-3}}{a(p_1 + p_2)} + 1,5}{\frac{26,4 \cdot 10^{-3}}{(d_2 - d_1)(p_1 + p_2)} + 1,5} \right), \text{ м}^3/\text{с}. \quad (6-129)$$

Проводимости трубопроводов иной формы для молекулярно-вязкостного режима течения газа не имеют аналитических выражений и могут быть рассчитаны по формуле (6-123), если воспользоваться значениями $U_{\text{в}}$ и $U_{\text{м}}$ для трубопроводов с соответствующим поперечным сечением. Значение поправочного множителя K_4 при этом можно рекомендовать рассчитывать по формуле (6-124) с той лишь разницей, что вместо значения d для цилиндрического трубопровода надо подставить величину $d_{\text{гидр}}$, найденную по формуле (6-41). Погрешность при этом получается тем большей, чем больше поперечное сечение рассчитываемого трубопровода отличается от круглого.

Проводимости коротких трубопроводов при молекулярно-вязкостном режиме течения следует также рассчитывать по формуле (6-123), подставляя в нее значения проводимости рассматриваемого короткого трубопровода, рассчитанные соответственно рекомендациям для вязкостного и молекулярного режимов течения газа.

6-3. МЕСТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Турбулентный режим течения газа. При турбулентном режиме течения газа потери давления в местном сопротивлении равны:

$$\Delta p_{\text{мест}} = \zeta \frac{\rho u_{\text{ср}}^2}{2}, \quad (6-130)$$

где ζ — коэффициент местного сопротивления, равный отношению потерянному напора к скоростному напору, равному $\rho u_{\text{ср}}^2/2$; ρ — плотность среды; $u_{\text{ср}}$ — средняя по сечению скорость потока газа.

Учитывая соотношение (6-28) и уравнение (1-18), запишем:

$$\Delta p_{\text{мест}} = \zeta \frac{M}{R_0 T} \frac{(Q')^2}{2 p_{\text{ср}} A^2}, \quad (6-131)$$

где M — молекулярная масса газа; R_0 — универсальная газовая постоянная; T — температура; Q' — поток; $p_{\text{ср}}$ — среднее давление газа при протекании через местное сопротивление; A — площадь поперечного сечения канала-трубопровода в месте расположения сопротивления.

Таким образом, поток газа, проходящий через местное сопротивление, равен:

$$Q' = A \sqrt{\frac{2 R_0 T}{\zeta M} \Delta p_{\text{мест}} p_{\text{ср}}}, \quad \text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}. \quad (6-132)$$

Проводимость местного сопротивления будет при этом равна:

$$U_{\tau} = A \sqrt{\frac{2 R_0 T}{\zeta M} \frac{p_{\text{ср}}}{\Delta p_{\text{мест}}}}, \quad \text{м}^3 / \text{с}. \quad (6-133)$$

Значения коэффициентов ζ при турбулентном режиме течения газа практически не зависят от числа Re . Необходимо учесть, что для местных сопротивлений критическое значение числа Re будет $Re_{\text{кр.мест}} = 500 \div 800$, причем меньшее значение следует относить к сравнительно резким изменениям поперечного сечения или направления потока (внезапное расширение, клапан, крутой поворот и т. п.).

Отметим, что приводимые в литературе значения коэффициентов местных сопротивлений получены для несжимаемой жидкости и должны быть несколько иными применительно к газам, однако разница оказывается относительно небольшой и с точностью, допустимой для инженерных расчетов, значения коэффициентов местных сопротивлений для газов можно принимать такими же, как для несжимаемых (капельных) жидкостей.

Вязкостный режим течения газа. Местные сопротивления при вязкостном режиме течения газа в значительной мере зависят от числа Re и обычно записываются в форме

$$\zeta = \frac{K_5}{Re} + K_6, \quad (6-134)$$

где K_5 и K_6 — безразмерные коэффициенты.

Первое слагаемое в выражении (6-134) даст часть коэффициента местного сопротивления, зависящую от числа Re , а второе — постоянную.

Напомним, что при расчете потерь давления в сложном трубопроводе при вязкостном режиме течения необходимо учитывать разные значения числа $Re_{\text{кр}}$ для цилиндрического трубопровода и местного сопротивления. Может оказаться, что течение в целом вязкостное, а в местах расположения местных сопротивлений — турбулентное. Обычно при вязкостном режиме течения газа

для учета потери давления в местных сопротивлениях условно увеличивают длину трубопровода против фактической, полагая, что

$$l_{\text{расч}} = l_{\text{факт}} + l_{\text{экв}}, \quad (6-135)$$

где $l_{\text{факт}}$ — фактическая длина трубопровода; $l_{\text{экв}}$ — дополнительная длина трубопровода, потери давления на которой равны потерям давления в местных сопротивлениях.

Так, принимают, что сопротивление крана равно сопротивлению трубопровода с тем же поперечным сечением, что и у крана, но с длиной в 2–3 раза больше его длины.

Анализируя выражение (6-134), можно заключить, что в случае преобладающего значения потерь давления в местном сопротивлении за счет турбулизации потока следует рассчитывать величину проводимости по формуле (6-133). В случае, если основные потери давления связаны с трением, играет роль лишь первое слагаемое в выражении (6-134) и потери давления в местном сопротивлении будут равны:

$$\Delta p_{\text{мест}} = \frac{K_5}{\text{Re}} \frac{\rho u_{\text{ср}}^2}{2} = \frac{K_5 \eta}{2 d_{\text{гидр}}} \frac{Q'}{A p_{\text{ср}}}, \quad (6-136)$$

где $d_{\text{гидр}}$ — гидравлический диаметр поперечного сечения потока в месте прохождения местного сопротивления [см. (6-41)]:

$$K_5 / \text{Re} = \zeta.$$

Поток газа равен:

$$Q' = \frac{2 A d_{\text{гидр}}}{\eta K_5} \Delta p_{\text{мест}} p_{\text{ср}}, \quad (6-137)$$

и проводимость местного сопротивления будет:

$$U_v = \frac{2 A d_{\text{гидр}}}{\eta K_5} p_{\text{ср}} = \frac{2,52 A d_{\text{гидр}}}{\lambda_1 K_5} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} p_{\text{ср}} = \frac{115 A d_{\text{гидр}}}{\lambda_1 K_5} \sqrt{\frac{T}{M}} p_{\text{ср}}. \quad (6-138)$$

Сравнение (6-138) с формулами (6-47), (6-48) показывает, что эквивалентная длина трубопровода равна:

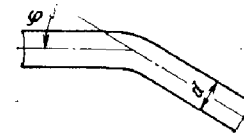
$$l_{\text{экв}} = 0,0245 \frac{d^2 K_5}{A d_{\text{гидр}}}, \quad (6-139)$$

и для круглого поперечного сечения

$$l_{\text{экв}} = 0,0312 K_5 d. \quad (6-140)$$

Молекулярный режим течения газа. Влияние местных сопротивлений при молекулярном режиме течения газа, так же как и при вязкостном, обычно учитывают путем некоторого увеличения расчетной длины трубопровода против фактической, т. е. используют при расчетах проводимости зависимость (6-135). Так, в соответствии с рекомендацией [16] влияние изгиба трубопровода под углом 90° (прямого колена) учитывается удлинением трубопровода на 1,33 диаметра, т. е.

$$l_{\text{расч}} = l_{\text{факт}} + 1,33 d i, \quad (6-141)$$



где d — диаметр трубопровода; i — число изгибов трубопровода под углом 90° .

Рис. 6-12. Трубопровод с изгибом.

При углах изгиба трубопровода меньше 90° рекомендуется следующее выражение [17]:

$$l_{\text{экв}} = 2,6 d \frac{\varphi}{180^\circ}, \quad (6-142)$$

где d — диаметр трубопровода; φ — угол изгиба трубопровода в градусах (рис. 6-12).

Проводимость крана в соответствии с рекомендациями [24] принимается равной 6–15% проводимости диафрагмы с диаметром, равным диаметру условного прохода крана. Укажем, что чем больше диаметр условного прохода крана, тем относительно больше его проводимость и при условных проходах 0,4 м может быть равна 60–70% проводимости соответствующей диафрагмы (это относится к задвижкам).

С целью приведения расчетов проводимости при наличии местных сопротивлений к единой форме примем так же, как и при вязкостном режиме течения, что сопротивление крана или иного местного сопротивления может быть учтено увеличением расчетной длины трубопровода в соответствии с формулой (6-135).

При расчете эквивалентной длины крана полагаем, что трубопровод и проходное отверстие крана круглые. Тогда в соответствии с формулами (6-22), (6-98) и изложенными выше рекомендациями получим:

$$l_{\text{экв. кран}} = 0,33 \frac{d}{K_{\text{кран}}}, \quad (6-143)$$

где $K_{\text{кран}}$ — отношение проводимости крана к проводимости диафрагмы с диаметром, равным диаметру условного прохода крана.

Молекулярно-вязкостный режим течения газа. Проводимость местного сопротивления, в частности крана, при молекулярно-вязкостном режиме может быть рассчитана методом интерполяции по следующей формуле:

$$U_{\text{м-в.кран}} = U_{\text{м.кран}} + \frac{U_{\text{в.кран}} - U_{\text{м.кран}}}{p_{\text{в}} - p_{\text{м}}} (p_i - p_{\text{м}}), \quad (6-144)$$

где $U_{\text{м.кран}}$ — проводимость крана при молекулярном режиме; $U_{\text{в.кран}}$ — проводимость крана при вязкостном режиме и среднем давлении $p_{\text{н}}$; $p_{\text{в}}$ — верхняя граница молекулярно-вязкостного режима; $p_{\text{м}}$ — нижняя граница молекулярно-вязкостного режима; p_i — давление, для которого определяется $U_{\text{м-в.кран}}$.

Несколько более точные результаты можно получить при использовании формулы (6-126) для расчета проводимости крана при молекулярно-вязкостном режиме течения газа. При этом надо в первое слагаемое подставить $l_{\text{экр}}$ крана при вязкостном режиме и во второе — при молекулярном.

6.4. ТЕЧЕНИЕ ГАЗА ЧЕРЕЗ КАПИЛЛЯР

Особенностью течения газа в капилляре, используемом в качестве патекателя или в динамическом уплотнении, является весьма значительный перепад давлений по его длине от атмосферного до давления в высоковакуумной системе. При этом на разных участках капилляра будут существовать одновременно разные режимы течения газа — от вязкостного до молекулярного. Существование турбулентного режима мало вероятно ввиду малости поперечного сечения канала. Для вычисления проводимости капилляра можно воспользоваться формулой (6-123). Поскольку множитель K_4 меняется при изменении давления в пределах от 0,81 до 1,0, то с относительной ошибкой менее 10% можно применять его значение постоянным и равным 0,9. Тогда формула (6-123) для рассматриваемого случая запишется следующим образом [17]:

$$U_{\text{м-н}} = U_{\text{в}} + 0,9U_{\text{м}}. \quad (6-145)$$

Поток газа для элемента капилляра длиной dl будет равен:

$$dQ' = dU dp, \quad (6-146)$$

где dU — проводимость участка капилляра длиной dl ; dp — падение давления на участке капилляра длиной dl .

Проводимость трубопровода при вязкостном режиме в общем виде можно представить следующим образом:

$$U_{\text{в}} = \frac{\alpha_{\text{в}} \beta_{\text{в}}}{l} p_{\text{ср}}, \quad (6-147)$$

где $\alpha_{\text{в}}$ — множитель, зависящий от свойств протекающего по трубопроводу газа; $\beta_{\text{в}}$ — множитель, зависящий от геометрических размеров и формы поперечного сечения трубопровода.

Аналогично проводимость трубопровода при молекулярном режиме будет представлена в виде

$$U_{\text{м}} = \frac{\alpha_{\text{м}} \beta_{\text{м}}}{l}, \quad (6-148)$$

где $\alpha_{\text{м}}$ и $\beta_{\text{м}}$ — аналогичные предыдущим множители для молекулярного режима течения газа.

С учетом (6-147) и (6-148) формула (6-145) запишется:

$$U = \frac{\alpha_{\text{в}} \beta_{\text{в}}}{l} p_{\text{ср}} + 0,9 \frac{\alpha_{\text{м}} \beta_{\text{м}}}{l} = \frac{0,9 \alpha_{\text{м}} \beta_{\text{м}}}{l} \left(1 + \frac{\alpha_{\text{в}} \beta_{\text{в}}}{0,9 \alpha_{\text{м}} \beta_{\text{м}}} p_{\text{ср}} \right). \quad (6-149)$$

Проводимость участка капилляра длиной dl будет равна:

$$dU = \frac{0,9 \alpha_{\text{м}} \beta_{\text{м}}}{dl} \left(1 + \frac{\alpha_{\text{в}} \beta_{\text{в}}}{0,9 \alpha_{\text{м}} \beta_{\text{м}}} p \right), \quad (6-150)$$

где p — давление газа на рассматриваемом участке трубопровода.

В результате выражение (6-146) примет вид:

$$dQ' = 0,9 \alpha_{\text{м}} \beta_{\text{м}} \left(1 + \frac{\alpha_{\text{в}} \beta_{\text{в}}}{0,9 \alpha_{\text{м}} \beta_{\text{м}}} p \right) \frac{dp}{dl}. \quad (6-151)$$

После интегрирования (6-151) получим:

$$Q' = \frac{0,9 \alpha_{\text{м}} \beta_{\text{м}}}{l} \left(p + \frac{\alpha_{\text{в}} \beta_{\text{в}}}{1,8 \alpha_{\text{м}} \beta_{\text{м}}} p^2 \right) \Big|_{p_1}^{p_2}, \quad (6-152)$$

где p_1 и p_2 — давления по концам капилляра, причем p_1 — давление на внешней стороне, а p_2 — давление со стороны вакуумного объема, т. е. $p_1 \gg p_2$.

Учитывая, что p_2 обычно пренебрежимо мало по сравнению с p_1 , окончательно запишем:

$$Q' = \frac{0,9\alpha_M\beta_M}{l} \left(p_1 + \frac{\alpha_V\beta_V}{1,8\alpha_M\beta_M} p_1^2 \right). \quad (6-153)$$

Из выражения (6-152) или (6-153) по заданным давлениям на концах капилляра можно найти поток газа.

Распределение давления по длине капилляра можно найти затем из следующего выражения, полученного из (6-151) после интегрирования:

$$p = \frac{-0,9\alpha_M\beta_M + \sqrt{0,81\alpha_M^2\beta_M^2 + 2\alpha_V\beta_V Q' x}}{\alpha_V\beta_V}, \quad (6-154)$$

где x — расстояние от входа капилляра (сечение, где давление равно p_1) до рассматриваемого сечения.

Для капилляра круглого сечения выражения (6-153), (6-154) после подстановки значений α_V , β_V , α_M и β_M из (6-48) и (6-98) получим соответственно:

$$Q' = 34,3 \frac{d^3}{l} \sqrt{\frac{T}{M}} \left(p_1 + \frac{4,12 \cdot 10^{-2} d}{\lambda_1} p_1^2 \right), \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}, \quad (6-155)$$

и

$$p = \frac{-34,3 d^3 \sqrt{\frac{T}{M}} + \sqrt{1,176 \cdot 10^3 d^6 \frac{T}{M} + \frac{5,64 d^4}{\lambda_1} \sqrt{\frac{T}{M}} Q' x}}{\frac{2,82 d^4}{\lambda_1} \sqrt{\frac{T}{M}}}. \quad (6-156)$$

Эти же выражения для воздуха при 293 К будут записаны в форме

$$Q' = \frac{1,09 \cdot 10^2 d^3}{l} (p_1 + 6,25 d p_1^2), \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}; \quad (6-157)$$

$$p = \frac{-1,09 \cdot 10^2 d^3 + \sqrt{1,19 \cdot 10^4 d^6 + 2,72 \cdot 10^3 d^4 Q' x}}{1,36 \cdot 10^3 d^4}. \quad (6-158)$$

В качестве примера укажем, что при давлении $p_1 = 10^5$ Па, длине капилляра $l = 1$ см $= 10^{-2}$ м и диаметре капилляра $d = 10$ мкм $= 10^{-5}$ м в нем установится поток $Q' = 7,9 \cdot 10^{-6}$ м³ · Па/с.

СОГЛАСОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

7-1. СОГЛАСОВАНИЕ НАСОСОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО

При использовании пароструйных, молекулярных и двухроторных насосов последовательно с этими основными насосами должны подключаться вспомогательные насосы (см. гл. 12). Выбор параметров вспомогательного насоса основан на том, что поток откачиваемых газов Q' должен быть одинаковым в рассматриваемый момент времени в любом сечении вакуумной системы, а также для основного и вспомогательного насосов, соединенных последовательно (рис. 7-1):

$$Q' = S_{н.осн} p_1 = S_{н.всп} p_2, \quad (7-1)$$

где $S_{н.осн}$ — быстрота действия основного насоса при давлении p_1 на входе в основной насос; $S_{н.всп}$ — быстрота действия вспомогательного насоса при давлении p_2 на входе во вспомогательный насос в тот же момент времени.

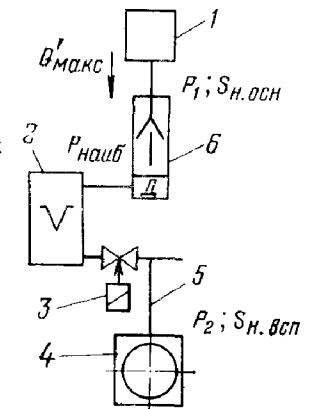


Рис. 7-1. К выбору насосов, соединенных последовательно.
1 — откачиваемый объем; 2 — форвакуумный баллон; 3 — кран; 4 — вспомогательный насос предварительного разрежения; 5 — соединительный трубопровод; 6 — основной высоковакуумный насос.

Так как давление p_1 на входе в основной насос и давление p_2 на входе во вспомогательный насос различны, то и быстрота действия $S_{н.осн}$ будет отличаться от $S_{н.всп}$.

Давление p_2 на входе во вспомогательный насос должно быть меньше давления $p_{наиб}$ (обычно приводится в паспорте высоковакуумного насоса) на выходе из высоковакуумного (основного) насоса, так как $p_{наиб}$ является наибольшим давлением на выходе, при котором еще работает высоковакуумный насос, но при превышении которого высоковакуумный насос прекращает работу.

Таким образом, вспомогательный насос должен быть способен не только удалять в единицу времени определенное количество газов, поступающих из основного насоса, но и поддерживать необходимое выпускное давление (равное или меньшее $p_{наиб}$) на его выходе.

После того как выбран тип насоса предварительного разрежения, быстрота действия его $S_{н.всп}$ определяется исходя из макси-

мального количества газов $Q'_{\text{макс}}$, которое предполагается удалять высоковакуумным насосом:

$$S_{\text{н.всп}} = \frac{Q'_{\text{макс}}}{p_2}, \quad (7-2)$$

где $Q'_{\text{макс}}$ — наибольший поток газов, который может быть удален основным насосом (определяется по кривой $Q'_n = f(p)$); p_2 — наибольшее допустимое давление на входе во вспомогательный насос; обычно $p_2 = (0,7 \div 0,75) p_{\text{наиб}}$.

Диаметр трубопровода, соединяющего насосы, чаще всего выбирают равным или несколько большим диаметра выпускного патрубка основного насоса. Затем определяют режим течения газа в соединительном трубопроводе при давлении p_2 и подсчитывают его проводимость.

После этого производят поверочный расчет, целью которого является определение давления, которое обеспечит выбранный вспомогательный насос в сечении выпускного патрубка основного насоса с учетом сопротивления проводимости соединительного трубопровода:

$$p_{\text{вып}} = \frac{Q'_{\text{макс}}}{S_0} = \frac{Q'_{\text{макс}} (U + S_{\text{н.всп}})}{U S_{\text{н.всп}}} \leq p_{\text{наиб}}. \quad (7-3)$$

Если неравенство (7-3) не выполняется, то надо взять вспомогательный насос с большей быстротой действия или увеличить проводимость соединительного трубопровода U и заново осуществить поверочный расчет.

Как уже отмечалось, при выборе вспомогательного насоса надо обеспечить определенное давление на выпускном патрубке основного насоса. Отметим, что обычно колебания этого давления в весьма широких пределах, но при условии, что не превышено значение $p_{\text{наиб}}$, не влияют на характеристики основного насоса. Однако это правило имеет определенные исключения. Так, при выборе вспомогательного механического насоса для работы последовательно с двухроторным насосом, используемым в качестве основного или бустерного (промежуточного), надо помнить, что двухроторный насос обеспечивает определенный перепад давлений между своим входным и выходным патрубками. Это значит, что при повышении давления на выпускном патрубке двухроторного насоса соответственно повысится давление на его входе за счет обратного перетекания газов.

Этот же недостаток, правда в значительно меньшей мере, характерен и для молекулярных насосов.

Наконец, часто требуется исключить влияние вспомогательного насоса на работу основного насоса, сказывающееся, например, в проникновении паров рабочей жидкости из механического насоса в кипятильник пароструйного высоковакуумного насоса. В последнем случае между основным и вспомогательным насосами может быть установлена ловушка. Однако гораздо лучшие результаты получаются при применении бустерного насоса, в качестве которого используется также пароструйный насос. При этом проводится согласование основного и вспомогательного насосов, бустерный же насос обычно выбирается со значительным запасом по производительности, часто на порядок и более.

7.2. РАСЧЕТ ФОРВАКУУМНОГО БАЛЛОНА

С целью уменьшения количества вакуумных насосов, сокращения габаритов вакуумной системы и увеличения коэффициента использования насосов между основным насосом и насосом предварительного разрежения устанавливают форвакуумный баллон, что позволяет отключать на длительное время насос предварительного разрежения или использовать его для откачки других частей вакуумной системы (см. рис. 7-1) [47].

Поток газа из объема 1, откачиваемый основным насосом, падает в форвакуумный баллон 2 и увеличивает давление в нем от минимального $p_{\text{мин}}$, которое достигается при откачке форвакуумного баллона насосом предварительного разрежения 4, до максимального $p_{\text{макс}}$, близкого к давлению, выше которого основной насос 6 прекращает работу.

Когда давление в форвакуумном баллоне достигает $p_{\text{макс}}$, включается насос предварительного разрежения и баллон откачивается до давления $p_{\text{мин}}$.

Промежуток времени $t_{\text{ф.б.}}$, в течение которого форвакуумный баллон может быть изолирован от насоса предварительного разрежения, называется временем работы форвакуумного баллона. Так как весь поток газа, проходящий через основной насос, идет на повышение давления в форвакуумном баллоне, то можно записать:

$$Q'_z t_{\text{ф.б.}} = V (p_{\text{макс}} - p_{\text{мин}}), \quad (7-4)$$

где Q'_z — суммарный поток газов, обусловленный потоком газов в выпускном патрубке основного насоса в данный момент времени и потоком газов, выделяющихся со стенок форвакуумного баллона и части вакуумной системы, соединяющей его с основным насосом; $t_{\text{ф.б.}}$ — время работы форвакуумного баллона; V — объем форвакуумного баллона.

Из уравнения (7-4) определяют объем форвакуумного баллона исходя обычно из следующих условий:

$$p_{\text{макс}} = (0,3 - 0,8) p_{\text{наиб}}, \quad (7-5)$$

где $p_{\text{наиб}}$ — наибольшее давление в выпускном патрубке основного насоса, при превышении которого насос прекращает работу;

$$p_{\text{мин}} = \frac{Q' (S_{\text{н.всп}} + U)}{S_{\text{н.всп}} U}, \quad (7-6)$$

где $S_{\text{н.всп}}$ — быстрота действия насоса предварительного разрежения; U — проводимость участка вакуумной системы между основным насосом и насосом предварительного разрежения.

Время работы форвакуумного баллона $t_{\text{ф.б.}}$ выбирается таким, чтобы обеспечивалась предварительная откачка рабочего объема насосом предварительного разрежения.

7.3. СОГЛАСОВАНИЕ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ, РАБОТАЮЩИХ ПАРАЛЛЕЛЬНО

Параллельно обычно включаются насосы, имеющие избирательные характеристики по откачке различных газов. К таким насосам относятся адсорбционные, ионно-getterные, магнитные, электроразрядные и другие электрофизические средства откачки. Укажем, что

при этом совершенно не обязательно соединять насосы параллельно трубопроводам. Насосы могут быть в принципе соединены и последовательно, но работать они при этом могут в параллель. Характерным примером такого включения насосов является совместная работа на один объем конденсационного водородного и пароструйного насосов. В этом случае пароструйный насос предназначен для откачки не конденсирующихся при температуре жидкого водорода газов (водород, неон, гелий) и создания предварительного разрежения в конденсационном насосе.

Совершенно так же в параллель к ионно-getterным насосам могут подключаться пароструйные или турбомолекулярные насосы, которые обеспечивают откачку инертных газов и метана.

Расчет вспомогательного насоса при этом сводится к определению потока не откачиваемых основным насосом газов и подбору вспомогательного насоса по принципу и скорости действия.

При согласовании вспомогательного насоса с электрофизическим насосом, например с магнитным электроразрядным, следует учитывать собственную скорость действия основного насоса по рассматриваемому газу. Вспомогательный насос должен в сумме с основным насосом обеспечить удаление всего потока газа. При этом надо обязательно учитывать возможную нестабильность во времени характеристик электрофизических и, в частности, магнитных электроразрядных насосов. С учетом этого скорость действия вспомогательного насоса выбирается обычно на 50—80% больше расчетного значения.

Довольно часто при конструировании вакуумных систем предусматривается установка нескольких однотипных насосов, работающих параллельно на один вакуумный объем с целью получения необходимой эффективной скорости откачки. Такой прием закономерен и дает удовлетворительные результаты, если все насосы обеспечивают получение близких значений предельного остаточного давления. В противном случае возможны перетекание газов и существенное снижение суммарной эффективной скорости откачки.

В подобных вакуумных системах целесообразно предусматривать возможность отключения насосов порознь с целью определения их характеристик и, в частности, предельного остаточного давления.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

РАСЧЕТ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

8-1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Расчет вакуумной системы сложного технологического оборудования выполняется, как правило, в два этапа.

Проектный расчет, в результате которого определяются принципиальная схема вакуумной системы, типы и размеры насосов, коммутирующие элементы и ориентировочные размеры соединительных трубопроводов.

Проверочный расчет, в результате которого уточняются характеристики насосов, размеры трубопроводов и

коммутирующих элементов, определяется время достижения заданного рабочего давления.

В качестве исходных величин для расчета обычно заданы предельное остаточное давление в рабочем объеме, поток газов, геометрические размеры рабочего объема, характер технологического процесса, для осуществления которого предназначена установка, время достижения заданного давления.

Часто при расчете вакуумной системы приходится определять поток газов, поступающих в нее. Для этого должны быть известны исходные характеристики продукции, позволяющие рассчитать поток газов.

Проектный расчет выполняется в следующей последовательности:

1. Исходя из заданных значений парциального и полного давлений, определяют типы насосов, обеспечивающих окончательную откачку рабочего объема.

2. По заданному или найденному расчетом потоку газов выбирают конкретный типоразмер насоса окончательной откачки; при этом поток газов, откачиваемых насосом, принимают постоянным.

3. Выбирают вспомогательные насосы и насосы предварительного разрежения. Обычно на этом этапе расчета вспомогательные насосы выбирают в соответствии с паспортными характеристиками основных насосов окончательной откачки.

4. Определяют принципиальную схему вакуумной системы, назначают ориентировочные размеры вакуумных трубопроводов, выбирают коммутирующие элементы, средства измерения давления и т. п.

5. Исходя из заданного времени предварительной откачки рабочего объема, выбирают насос предварительного разрежения; при этом обычно не учитывают предельное остаточное давление вакуумной системы.

После проведения проектного расчета конструируют вакуумную систему. В процессе конструирования уточняют все размеры вакуумных трубопроводов, типоразмеры коммутирующих элементов и т. п.

Проверочный расчет выполняется в следующей последовательности:

1. В соответствии с окончательными размерами вакуумной системы рассчитывают значения эффективной скорости откачки системы.

2. Рассчитывают время достижения заданного давления в рабочем объеме; при этом учитывают натекания и кинетику газовой выделения. При отсутствии этих данных в задании на проектирование выполняется их расчет.

3. Рассчитывают окончательное время предварительной откачки; при этом учитывают предельное остаточное давление насоса предварительного разрежения, газовой выделения и натекание, а также изменение быстроты действия насоса и проводимости трубопроводов в зависимости от давления.

При необходимости применения нестандартных элементов производят их конструирование и расчет. Однако эти расчеты, как правило, неспецифичны и выполняются по обычным методам, известным в общем машиностроении.

8-2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА ВЫСОКОВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В этом случае должны быть заданы основные технические характеристики оборудования: давление в вакуумной системе и парциальный состав остаточной среды; газовой поток, в том числе по составляющим, или условия, позволяющие рассчитать газовый поток (обрабатываемые изделия — их материал и геометрия, температура и длительность обработки, конструкция рабочей камеры оборудования); производительность оборудования или длительность технологического процесса.

Проектный расчет выполняется поэтапно следующим образом:

1. Разрабатывается принципиальная схема вакуумной системы, для чего сначала определяются оптимальные для данного конкретного оборудования типы высоковакуумных насосов. При этом необходимо руководствоваться наряду с требованиями к предельному остаточному давлению и парциальному составу среды также экономическими и эксплуатационными характеристиками, а также учитывать возможности предприятия, которое будет эксплуатировать оборудование.

Так, при наличии разводки жидкого азота и жестких требований к парциальному давлению тяжелых углеводородов оптимальным будет использование титанового охлаждаемого испарительного насоса.

В случае, если в составе потока откачиваемых газов велико парциальное давление инертных газов и имеются

те же ограничения по парциальному составу остаточной среды, что и в предыдущем случае, целесообразно использовать турбомолекулярные насосы.

Наконец, при значительных газовых потоках и не слишком жестких требованиях к парциальному давлению тяжелых углеводородов в остаточной среде наиболее целесообразно использование пароструйных насосов, оснащенных защитными устройствами или работающих на сложных эфирах в качестве рабочих жидкостей.

После выбора типа основного высоковакуумного насоса выбирается вспомогательный насос, определяются схема соединений, типы коммутирующих элементов. Затем выбирается тип насоса предварительной откачки рабочего объема. Часто в качестве этого насоса используется вспомогательный насос, что должно быть учтено в схеме соединений вакуумной системы; при относительно длительной предварительной откачке целесообразно применение форвакуумного баллона (см. § 7-2).

Если оборудование подключается к централизованной форвакуумной системе, обязательно применение блокировочных коммутирующих устройств.

2. В соответствии с заданным потоком откачиваемых газов выбирается типоразмер высоковакуумного насоса. Расчет проводится по формуле (2-7), причем эффективная быстрота откачки рабочего объема находится по уравнению (2-1). Выбирается насос с ближайшей большей величиной S_n .

В случае отсутствия данных по потоку газов производится его расчет, причем поток принимается постоянным во времени. Поток газов определяется по формуле (2-44). При определении количества газов, выделяющихся из обрабатываемых изделий, используют данные приложения 3 и формулу (4-1). Коэффициент неравномерности газовой выделения Ω будет тем больше, чем интенсивней ведется обработка и ажурнее геометрия изделия.

Поток газов, выделяющихся с поверхностей элементов рабочей камеры, обращенных в сторону вакуумной системы, находят по формуле (4-2). При этом порознь рассчитываются потоки газов от поверхностей с отличающейся температурой и изготовленных из разных материалов. Значения удельного газовой выделения приведены в приложении 2. В зависимости от принципиальной схемы оборудования выбираются соответствующие удель-

ные газовыделения. Если оборудование периодического действия и рабочий объем во время загрузки и выгрузки изделий периодически контактируют с атмосферным воздухом, следует принимать удельное газовыделение после 1 ч откачки. При загрузке продукции через шлюз следует принимать удельное газовыделение равным минимальным значениям, приведенным в приложении 2 (после отжига в вакууме или длительной откачки).

Составляющая потока газов, связанная с протеканием извне, принимается равной чувствительности течеискателя, с помощью которого предполагается проводить контроль вакуумной плотности рабочей камеры, умноженной на число возможных мест протекания (количество разъемных и неразъемных соединений, вводов движения и т. п.).

3. Вспомогательные насосы, работающие последовательно или параллельно с основными высоковакуумными насосами, выбираются обычно в соответствии с паспортными данными основных насосов. В отдельных случаях, когда условия эксплуатации основных насосов отличаются от паспортных, следует руководствоваться рекомендациями гл. 7.

Насосы предварительного разрежения рабочей камеры выбираются исходя из заданного времени предварительной откачки, причем эффективная скорость откачки находится по уравнению (2-32), а быстрота действия насоса предварительного разрежения — по уравнению (2-7). Быстрота действия насоса принимается равной большему значению $S_{п}$.

Проводится конструирование вакуумной системы, во время которого окончательно определяются размеры трубопроводов, типоразмеры коммутирующих элементов и защитных устройств, типы и места подключения датчиков вакуумметров, определяются методы обезгаживания элементов вакуумной системы. По окончании конструирования вакуумной системы проводится проверочный расчет, выполняемый также поэтапно.

5. В соответствии с окончательными размерами высоковакуумной системы рассчитывается окончательное значение проводимости участка между рабочей камерой и высоковакуумным насосом. Расчет выполняется по уравнениям (2-3) или (2-4). Значения проводимости отдельных участков вакуумной системы берутся по данным гл. 6.

6. По уравнению (2-6) определяют эффективную быстроту откачки рабочей камеры.

7. С учетом кинетики газовыделения рассчитывают время достижения заданного давления в рабочей камере. При отсутствии этих данных в задании на проектирование выполняют расчет кинетики газовыделения.

Поскольку в большинстве случаев изделия обрабатываются при температурах больше 700 К, газовыделение из них определяется процессами диффузии. Расчет выполняют в соответствии с рекомендациями гл. 4. Начальные газосодержания выбираются из приложений 3 и 4. При отсутствии сведений по начальному газосодержанию используют данные приложения 6 по растворимости газов с учетом технологии предшествующей обработки материала или данные приложения 3.

Скорости удельного газовыделения рассчитывают для всего технологического процесса обработки изделий. Количество точек отсчета по времени принимают обычно равным 10—20 в зависимости от длительности процесса и скорости изменения удельного газовыделения. Наибольшее время обезгаживания, для которого рассчитывается газовыделение, должно быть на 20—30% больше заданной длительности технологического процесса обработки изделий.

Затем с учетом суммарной поверхности изделий определяют газовыделение изделий $Q'_{изд}$.

Газовыделение с поверхностей рабочей камеры рассчитывают в соответствии с рекомендациями гл. 3.

Для холодных поверхностей можно воспользоваться данными приложения 2 или кривыми удельного газовыделения в зависимости от времени откачки, приведенными на рис. 13-1 и 13-2.

Количество точек отсчета и длительность обезгаживания принимаются такими же, какие были приняты при расчете газовыделения из изделий.

Суммарное газовыделение с поверхностей рабочей камеры и высоковакуумной системы рассчитывают с учетом общей поверхности отдельных элементов, отличающихся материалом или температурой.

При проверочном расчете учитывается также поток газов, связанный с проницаемостью отдельных элементов рабочей камеры. Расчет проницаемости выполняют в соответствии с рекомендациями гл. 4 с использованием данных приложения 10.

Суммарный поток газов за счет проницаемости также рассчитывают с учетом поверхностей соответствующих элементов. Затем в соответствии с уравнением (2-44) определяют суммарный поток газов и давление в рабочей камере для каждого отрезка времени. По графику $p_1=f(t)$ определяют время достижения заданного давления.

В случае, если это время равно или меньше заданного, переходят к расчету времени предварительной откачки рабочей камеры.

Возможны случаи, когда существенное влияние на суммарный поток газов в конце технологического процесса оказывает газыделение конструктивных элементов рабочей камеры или их проницаемость. Тогда целесообразно с целью улучшения технических характеристик оборудования изменить конструкцию рабочей камеры таким образом, чтобы фоновые потоки газов были минимальными.

8. Рассчитывают окончательное время предварительной откачки по формулам (2-32), (2-35) или (2-42). Проводимости элементов системы предварительной откачки рассчитывают по уравнениям соответствующих параграфов гл. 6. Суммарное значение проводимости определяют по формулам (2-3) или (2-4).

9. В соответствии с рекомендациями гл. 7 выбирают вспомогательные насосы и рассчитывают их быстроту действия. При наличии форвакуумного баллона проводят его расчет по методике, изложенной в § 7-2.

10. При использовании для предварительной откачки централизованной форвакуумной системы (ЦФС) время достижения предварительного разрежения может быть ориентировочно рассчитано в соответствии с рекомендациями § 8-5. При использовании ЦФС для создания предварительного разрежения на выходе из основных насосов или для постоянной откачки рабочих объемов оборудования следует рассчитать перепад давлений на соответствующих соединительных трубопроводах по уравнению (2-2). Сумма полученного перепада давлений и наибольшего рабочего давления в магистрали ЦФС должна быть равна или меньше давления предварительного разрежения на выходе основного насоса или заданного давления в рабочем объеме.

8-3. РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ С ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ НАСОСАМИ

Рассмотрим последовательность расчета вакуумной системы оборудования с параллельно работающими насосами. Схема вакуумной системы с параллельно работающими насосами показана на рис. 8-1.

Последовательность расчета подобных вакуумных систем следующая:

1. Выполняют расчет рабочей камеры K . Порядок расчета практически не отличается от изложенного в § 8-2. В результате выполнения этого этапа расчета выбирают средства откачки рабочей камеры.

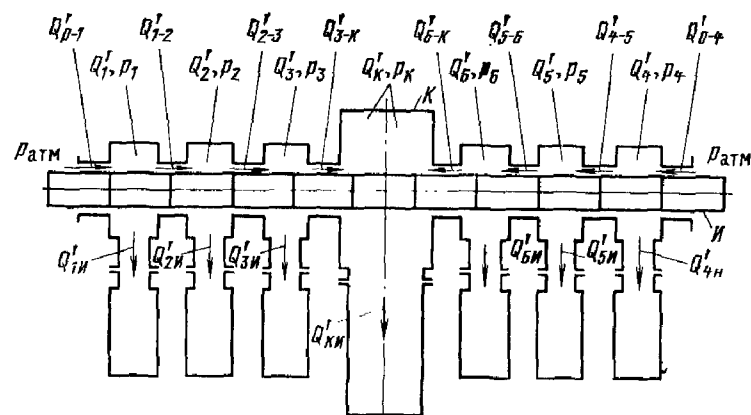


Рис. 8-1. Принципиальная схема установки с открытой шлюзовой системой и параллельно работающими насосами. K — рабочая камера; $И$ — изделия или кассеты с изделиями.

Поток газа $Q'_{3-K} + Q'_{6-K}$, попадающий в рабочую камеру из шлюзовых каналов, повышает давление и создает дополнительную нагрузку на насос рабочей камеры. При этом давление в рабочей камере не должно превышать допустимого значения. Поэтому если при расчете удастся подобрать средства откачки, обеспечивающие давление, меньшее заданного, то разница между заданным давлением и полученным при расчете может быть использована в качестве резерва, позволяющего соответственно повысить p_K за счет потока газов $Q'_{3-K} + Q'_{6-K}$. Допустимая величина потока газов будет равна:

$$Q'_{3-K} + Q'_{6-K} = S_{0,K} \Delta p_K, \quad (8-1)$$

где $S_{0.к}$ — эффективная быстрота откачки рабочей камеры; $\Delta p_k = p_{k.зад} - p_{k.расч}$ — разница между заданным значением давления в рабочей камере и полученным в результате расчета.

Может оказаться, что $\Delta p_k \approx 0$, и тогда давление в ближайших к рабочей камере шлюзах следует принять равным давлению в рабочей камере, т. е. для показанной на рис. 8-1 схемы

$$p_k = p_3 = p_6 \text{ и } Q'_{3-k} = Q'_{6-k} = 0. \quad (8-2)$$

2. Задаются определенным числом шлюзов и давлениями в них. При этом чем меньше давление в рабочей камере, тем большим должно быть количество шлюзов. Практически увеличивать количество шлюзов больше пяти нецелесообразно, так как при дальнейшем увеличении суммарный поток газов, удаляемый насосами шлюзов, уменьшается незначительно, а вакуумная система усложняется. При выборе уровней давлений в шлюзах надо иметь в виду рабочие диапазоны принятых средств откачки.

Можно рекомендовать разбивку общего перепада давлений между входом и рабочей камерой в следующих отношениях:

$$\frac{p_{атм}}{p_1} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{p_2}{p_3} = \dots = \frac{p_{n-1}}{p_n} = \frac{p_n}{p_k}, \quad (8-3)$$

где n — количество шлюзов.

Отношение (8-3) составлено для одной линии шлюзов — линии загрузки или выгрузки. Обычно с целью упрощения конструкции обе линии выполняются одинаковыми.

В случае, если принято $p_k = p_n$, отношение p_n/p_k отбрасывают.

3. Рассчитывают потоки, связанные с перетеканием газа по щелевым зазорам — уплотнениям между шлюзами. Для этого сначала определяют режимы течения газа в щелях, принимая в качестве определяющего размера среднюю высоту щели. Обычно длина щели гораздо больше ее высоты, и поэтому проводимости щелей следует рассчитывать по формулам (6-58), (6-75), (6-107) и (6-109). При этом обязательно надо учитывать неравномерность зазоров по периметру шлюза.

Проводимость щелей в канале между окнами загрузки и выгрузки и крайними шлюзами следует рассчитывать с учетом рекомендаций § 6-4, так как здесь

одновременно могут существовать различные режимы течения газа.

Длины каналов между шлюзами зависят от габаритов изделий, но обычно можно их принимать на два-три порядка большими средней высоты зазоров. Длину канала между загрузочным окном и 1-м шлюзом принимают примерно в 2 раза больше длин каналов между шлюзами, а также последним шлюзом и рабочей камерой, которые обычно одинаковы.

Потоки газа, перетекающего по щелевым зазорам, затем рассчитывают по формуле (2-2).

4. Рассчитывают дополнительные потоки газа в шлюзах. Методика расчета для каждой шлюзовой камеры в общем не отличается от изложенной в § 8-2, надо только учесть несколько повышенное газовыделение изделий или кассет в загрузочном канале, так как они сравнительно короткое время подвергаются откачке.

Для 1-го шлюза уравнение баланса потоков газа имеет вид:

$$Q'_{0-1} + Q'_{1-1} + Q'_{изд} - Q'_{1-2} - Q'_{1н} = 0, \quad (8-4)$$

где Q'_{0-1} — поток газа, поступающий в 1-й шлюз со стороны канала загрузки, причем

$$Q'_{0-1} = U_{0-1}(p_{атм} - p_1); \quad (8-5)$$

Q'_{1-1} — поток газа, связанный с газовыделением стенок 1-го шлюза и натеками; $Q'_{изд}$ — поток газа, связанный с газовыделением изделий, — в линии выгрузки отсутствует; Q'_{1-2} — поток газа между 1-м и 2-м шлюзами, причем

$$Q'_{1-2} = U_{1-2}(p_1 - p_2); \quad (8-6)$$

$Q'_{1н}$ — поток газа, удаляемый насосом 1-го шлюза, причем

$$Q'_{1н} = U_{1н}(p_1 - p_{ш1}) = S_{01}p_1 = S_{ш1}p_{ш1}; \quad (8-7)$$

U_{0-1} , U_{1-2} , $U_{1н}$ — проводимости вакуумной системы на участках между окном загрузки и первым шлюзом, между первым и вторым шлюзом и между 1-м шлюзом и насосом соответственно; S_{01} и $S_{ш1}$ — эффективная скорость откачки и быстрота действия насоса 1-го шлюза; $p_{атм}$, p_1 , p_2 , $p_{ш1}$ — атмосферное давление и давления в 1-м, 2-м шлюзах и во входном патрубке насоса откачки 1-го шлюза.

Совершенно так же составляются уравнения баланса потоков газа для других шлюзов.

5. Затем по формуле (8-7) выбирают типоразмер насоса откачки соответствующего шлюза.

Если оказывается, что нужен насос слишком большой производительности, необходимо уменьшить проводимость щелей за счет удлинения каналов. Если этой меры недостаточно, следует увеличить число шлюзов, уменьшив соответственно перепады давлений между соседними шлюзами.

8-4. ОТКАЧКА ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ С ПРОТЯЖЕННЫМИ КАМЕРАМИ

В случае, если один из размеров вакуумной камеры много больше двух других размеров и газовыделение стенок или поток газов на удаленном от насоса участке рабочей камеры достаточно велики, может возникнуть значительная разница давлений на участках рабочей камеры.

Простейшим примером подобной рабочей камеры будет цилиндрическая труба с одним заглушенным концом (рис. 8-2). Ко второму концу трубы присоединена вакуумная система. Нагрузка вакуумной системы связана только с газовыделением стенок, равномерно распределенным по поверхности цилиндрической трубы.

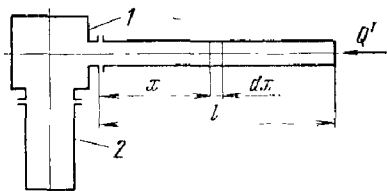


Рис. 8-2. Вакуумная система откачки цилиндрического трубопровода.

1 — вакуумная система; 2 — насос.

Решение этой задачи дадим для *молекулярного* режима течения газа, так как при других режимах течения газа дифференциальное уравнение, используемое в расчете, оказывается нелинейным и может быть решено только численными методами.

Укажем, что в большинстве случаев (электрофизические установки, магистрали ЦФС с давлением менее 13 Па и т. п.) [10] обычно наблюдается молекулярный режим.

Представим уравнение (6-94) в форме

$$U_m = \frac{\alpha_m \beta_m}{l}, \quad (8-8)$$

где α_m — коэффициент, зависящий от температуры и состава откачиваемого газа; β_m — коэффициент, завися-

щий от геометрических размеров и формы поперечного сечения трубопровода. При этом падение давления на участке трубы длиной dx будет равно:

$$\Delta p = \frac{q'_{дес} (l-x) \Pi}{\alpha_m \beta_m dx}, \quad (8-9)$$

где $\frac{\alpha_m \beta_m}{dx}$ — проводимость участка трубы длиной dx ;

$q'_{дес}$ — удельный поток десорбирующегося со стенок трубопровода газа; Π — периметр поперечного сечения трубопровода.

В результате разность давлений в сечении трубы на расстоянии x от входного фланца и в сечении фланца будет равна:

$$p_x - p_0 = \frac{q'_{дес} \left(lx - \frac{x^2}{2} \right) \Pi}{\alpha_m \beta_m}, \quad (8-10)$$

где p_0 — давление у места присоединения трубопровода к вакуумной системе, т. е. по длине трубы наблюдается параболический закон изменения давления. При наличии газовой нагрузки Q' на удаленном от вакуумной системы конце трубопровода получим:

$$p_x - p_0 = \frac{q'_{дес} \left(lx - \frac{x^2}{2} \right) \Pi + Q'x}{\alpha_m \beta_m}. \quad (8-11)$$

Если трубопровод имеет по длине несколько боковых патрубков, через каждый из которых поступает определенный поток газов, то весь трубопровод следует разбить на участки по длине и для каждого из них составить уравнение, подобное (8-11).

В случае значительного числа таких патрубков, равномерно размещенных по длине и с одинаковой газовой нагрузкой, можно условно полагать, что имеет место распределенная газовая нагрузка, равная:

$$q'_{тр} = \frac{iQ'}{l}, \quad (8-12)$$

где i — число патрубков; Q' — поток газа, натекающего через один патрубок; l — длина трубопровода.

При этом можно воспользоваться уравнением (8-10).

В [10] приведены зависимости, позволяющие рассчитать изменение давления по длине протяженных трубопроводов, откачиваемых несколькими насосами, а также методика выбора средств откачки для этого случая.

8-5. РАСЧЕТ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ФОРВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

Расчет централизованной форвакуумной системы (ЦФС) обычно сводится к определению необходимой быстроты действия насосов и диаметров трубопроводов при известном расположении вакуумных установок, цикличности их работы и требуемом разрежении [49].

Расчет ЦФС, как правило, ведется методом последовательных приближений, так как при вязкостном и молекулярно-вязкостном режимах течения газов существует довольно сложная зависимость между давлением в системе, быстротой действия насоса и геометрическими размерами трубопроводов. При этом число неизвестных, подлежащих определению, больше числа уравнений, которые можно составить, вследствие чего некоторыми величинами приходится задаваться.

ЦФС включает обычно три и более параллельно проложенных трубопровода (см. рис. 17-1) (см. § 17-6), работающих в двух различных режимах. Соответственно отличаются и методики расчета этих трубопроводов. Так, в трубопроводе III, предназначенном для создания предварительного разрежения на выпускных патрубках пароструйных насосов, давление во времени меняется в сравнительно узких пределах, и при его расчете режим работы считают *стационарным*.

В трубопроводах I и II, предназначенных для предварительной откачки рабочих камер технологических установок, перепад давлений может превышать два порядка, т. е. режим работы в них *нестационарный*.

Трубопроводы ЦФС могут иметь и иное назначение, но независимо от этого они будут рассчитываться по одной из двух рассмотренных далее методик.

А. Расчет трубопровода ЦФС, предназначенного для постоянной откачки. В этом режиме наряду с показанным на рис. 17-1 трубопроводом III для создания предварительного разрежения на выхлопе пароструйных насосов работают трубопроводы постоянной откачки защитных вакуумных камер технологического оборудова-

ния и т. п. Порядок расчета трубопровода постоянной откачки ЦФС следующий:

1. Оценивают суммарное поступление газа в трубопровод при максимальной нагрузке Q'_Σ .

Если нагрузкой этого трубопровода являются пароструйные или иные насосы, требующие предварительного разрежения, то нагрузка равна:

$$Q'_\Sigma = \sum_{i=1}^n S_i p_i, \quad (8-13)$$

где S_i — быстрота действия насосов; p_i — наибольшее давление запуска; n — количество работающих на трубопровод насосов.

В случае, если нагрузкой трубопровода являются вакуумные камеры технологического оборудования, суммируют потоки газов из этих объемов, которые могут быть заданы либо рассчитаны по методике, изложенной в § 8-2.

2. Задаются давлением на входе в насос ВН откачки данного трубопровода $p_{\text{вх}}$, которое должно быть несколько больше предельного давления насоса, но меньше максимально допустимого давления в трубопроводе — в случае откачки пароструйных насосов:

$$p_{\text{ост}} < p_{\text{н}} < p_{\text{наиб}},$$

где $p_{\text{ост}}$ — предельное остаточное давление насоса откачки трубопровода; $p_{\text{наиб}}$ — наибольшее выпускное давление пароструйного насоса.

3. Определяют необходимую быстроту действия насоса в соответствии с зависимостью

$$S_{\text{н}} = \frac{Q'_\Sigma}{p_{\text{н}}}. \quad (8-14)$$

и по данным каталогов выбирают насос с ближайшей большей быстротой действия.

4. Определяют необходимую проводимость трубопровода, полагая, что весь поток газов Q'_Σ поступает в трубопровод из наиболее удаленного объекта:

$$U = \frac{Q'_\Sigma}{p_{\text{наиб}} - p_{\text{н}}}. \quad (8-15)$$

5. В соответствии с рекомендациями § 6-3 определяют длину трубопровода $l_{\text{расч}}$.

При определении $l_{расч}$ необходимо предварительно задаться режимом течения газа, который зависит от неизвестного пока диаметра трубопровода.

При откачке трубопровода механическим вакуумным насосом можно рекомендовать для предварительного расчета воспользоваться закономерностями молекулярно-вязкостного режима течения газа.

6. Определяют диаметр трубопровода по формуле (6-127), полагая значение множителя $K_4=0,9$. Принимают диаметр трубопровода ближайшим по сортаменту труб.

7. Последовательно определяют давления в узловых точках трубопровода — местах присоединения объектов, идя по направлению от насоса к концу трубопровода.

Расчет выполняют по формуле (2-2), которая для этого случая преобразовывается к виду:

а) при вязкостном режиме течения газа для k -й узловой точки с использованием уравнения (6-49)

$$p_k = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=k}^n Q'_i\right) l_k}{6,8 \cdot 10^2 d_k^4} + p_{k-1}^2}; \quad (8-16)$$

б) при молекулярно-вязкостном режиме течения газа с использованием уравнения (6-127) при значении $K_4=0,9$ (с ошибкой $\pm 10\%$)

$$p_k = \frac{-1 + \sqrt{1 + 156 l_k p_{k-1}^2 + 25 l_k p_{k-1} + 0,229 \frac{\left(\sum_{i=k}^n Q'_i\right) l_k}{d_k^2}}}{12,5 l_k}; \quad (8-17)$$

в) при молекулярном режиме течения газа с учетом газовыделения в трубопроводе при помощи уравнения (8-11) с использованием уравнения (6-99)

$$p_k = \frac{q'_{тр,к} \frac{l_k^2}{2} + \left(\sum_{i=k}^n Q'_i\right) l_k}{1,21 \cdot 10^2 d_k^3} + p_{k-1}, \quad (8-18)$$

где d_k , l_k и $q'_{тр,к}$ — диаметр, длина и скорость газовыделения и соответственно, отнесенные к единице длины трубо-

провода между k -й и $(k-1)$ -й узловыми точками;

p_{k-1} — давление в $(k-1)$ -й узловой точке; $\sum_{i=k}^n Q'_i$ — поток газа на участке трубопровода между k -й и $(k-1)$ -й точками.

Режимы течения газа определяют в соответствии с рекомендациями § 2-5.

8. Определяют давления на выходе из объектов (вакуумных камер технологического оборудования, выпускных патрубков пароструйных насосов и т. п.), присоединенных к трубопроводу. Для этого также используют формулы (8-16), (8-17) или (8-18) в зависимости от режима течения газа в соединительном трубопроводе.

В результате расчета надо убедиться, что давление не превышает заданного давления в вакуумных камерах или давления $p_{наиб}$ при откачке пароструйных насосов. В противном случае необходимо увеличить диаметр трубопровода ЦФС или взять насос ВН с большей быстротой действия.

9. Производят проверку трубопровода на повышение давления в нем при подключении наиболее крупного объема V_i или нескольких одновременно подключаемых объемов, находящихся под давлением p_i , большим давлением в трубопроводе. При этом давление в трубопроводе повысится до величины

$$p_{тро} = \frac{p_i V_i + p_{тр1} V_{тр}}{V_i + V_{тр}}, \quad (8-19)$$

где $p_{тр1}$ — среднее начальное давление в трубопроводе; $V_{тр}$ — объем трубопровода.

При этом должно быть

$$p_{тр1} < p_{наиб}.$$

Б. Расчет трубопровода ЦФС, предназначенного для предварительной откачки рабочих камер оборудования. В трубопроводе предварительной откачки рабочих камер оборудования ЦФС режим течения газа нестационарный и, строго говоря, не может быть причислен к квазистационарным режимам, так как неравенство (2-26) не соблюдается в подавляющем большинстве случаев. Поэтому закономерности, полученные в § 2-6, не отражают реальную картину применительно к трубопроводам предварительной откачки ЦФС.

Уравнение неразрывности потока газа для нестационарного режима течения по трубопроводу имеет вид:

$$\frac{\partial Q'_x}{\partial x} - A \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (8-20)$$

где Q'_x — поток газа через сечение площадью A на расстоянии x .

Уравнение (8-20) аналитически в общем виде не решено, известно лишь решение этого уравнения для молекулярного режима течения газа [75]. В этом случае уравнение неразрывности записывается следующим образом:

$$\frac{Ul}{A} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad (8-21)$$

где U — проводимость трубопровода, рассчитываемая по уравнению (6-92).

Обычно в качестве начального условия можно принять, что давление в вакуумной системе постоянно и равно $p_{нач}$.

В простейшей вакуумной системе к одному концу трубопровода присоединен вакуумный насос, а к другому — откачиваемый объем. Граничные условия при этом будут:

$$-Ul \frac{\partial p}{\partial x} = S_n p, \quad (8-22)$$

где S_n — быстрота действия насоса:

$$-Ul \frac{\partial p}{\partial x} = -V \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t}, \quad (8-23)$$

или, если использовать (8-21),

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{A}{V} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{A}{UlV} \frac{\partial Q}{\partial t} = 0, \quad (8-24)$$

где V — откачиваемый объем; $\frac{\partial Q}{\partial t} = Q'$ — поток газа, поступающего в откачиваемый объем.

Решение уравнения (8-21) получится в виде ряда, в котором при принятом нами начальном условии мож-

но ограничиться лишь первым членом:

$$p = p_{нач} \frac{2 \frac{S_n}{U} e^{-\varphi^2_1 \frac{Ul}{Al}} \left(\cos \varphi_1 - \frac{x}{l} - \right)}{\varphi_1 \left[\frac{\left(\frac{S_n}{U} + \frac{V}{Al} \varphi^2_1 \right) \left(1 + \frac{V}{Al} \frac{S_n}{U} \right)}{\left(\varphi^2_1 + \frac{S_n^2}{U^2} \right) \left(1 + \frac{V^2}{A^2 l^2} \varphi^2_1 \right)} + \right.} \rightarrow$$

$$\left. - \frac{V}{Al} \varphi_1 \sin \varphi_1 \frac{x}{l} \right) + \sqrt{\left(\varphi^2_1 + \frac{S_n^2}{U^2} \right) \left(1 + \frac{V^2}{A^2 l^2} \varphi^2_1 \right)} \right], \quad (8-25)$$

где φ_1 — первый корень трансцендентного уравнения

$$\frac{\frac{S_n}{U} - \frac{V}{Al} \varphi}{1 + \frac{S_n}{U} \frac{V}{Al}} = \operatorname{tg} \varphi. \quad (8-26)$$

Проще всего корень уравнения (8-26) найти подбором. При $x=0$ уравнение (8-25) несколько упрощается:

$$p = p_{нач} K e^{-\frac{U \varphi^2_1}{Al} t}; \quad (8-27)$$

$$K = \frac{2 \frac{S_n}{U}}{\varphi_1 \left[\frac{\left(\frac{S_n}{U} + \frac{V}{Al} \varphi^2_1 \right) \left(1 + \frac{V}{Al} \frac{S_n}{U} \right)}{\sqrt{\left(\varphi^2_1 + \frac{S_n^2}{U^2} \right) \left(1 + \frac{V^2}{A^2 l^2} \varphi^2_1 \right)}} + \right.} \rightarrow$$

$$\left. - \frac{V}{Al} \varphi_1 \sin \varphi_1 \frac{x}{l} \right) + \sqrt{\left(\varphi^2_1 + \frac{S_n^2}{U^2} \right) \left(1 + \frac{V^2}{A^2 l^2} \varphi^2_1 \right)} \right]. \quad (8-28)$$

Значения φ_1 и K можно найти по графикам на рис. 8-3 и 8-4.

Формула (8-27) может быть записана в виде

$$t = \frac{Al}{U \varphi^2_1} \ln \left(K \frac{p_{нач}}{p} \right). \quad (8-29)$$

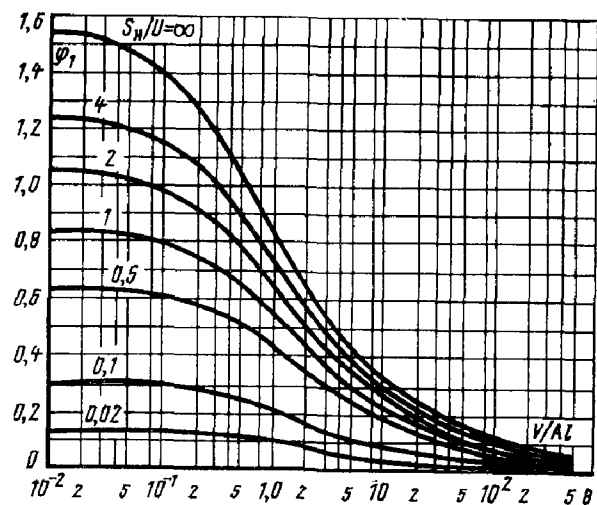


Рис. 8-3. Графики для определения первого корня уравнения (8-26).

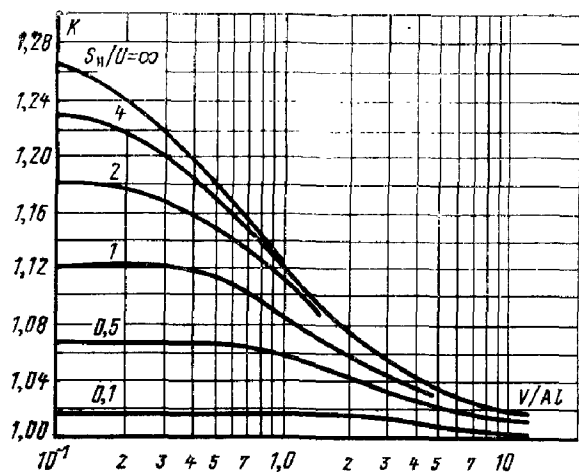


Рис. 8-4. Графики для определения коэффициента K в уравнении (8-27).

Однако молекулярный режим течения газа наступает практически лишь в конце процесса откачки последним трубопроводом ЦФС.

В связи с тем, что уравнение (8-20) пригодно только при молекулярном режиме течения газа, для ориентировочных расчетов можно рекомендовать следующий искусственный прием.

Расчеты проводятся с использованием уравнений (2-32) или (2-35) с той лишь разницей, что при расчете откачиваемого объема учитывается также и объем трубопровода, т. е.

$$V_{\text{расч}} = V + Al, \quad (8-30)$$

где V — откачиваемый объем; Al — объем трубопровода; $V_{\text{расч}}$ — расчетный откачиваемый объем.

При расчете проводимости трубопровода для последующего определения эффективной скорости откачки следует принимать:

$$l_{\text{расч}} = 0,7l, \quad (8-31)$$

где $l_{\text{расч}}$ — длина трубопровода, учитываемая при расчете проводимости трубопровода; l — фактическая длина трубопровода. Погрешность определения длительности откачки при этом обычно не больше $\pm 25\%$.

При этом, так же как и при расчете по формуле (8-29), с увеличением проводимости канала и соответственно его поперечного сечения и объема длительность откачки сначала уменьшается, достигает минимума, а затем начинает увеличиваться, что иллюстрируется графиками на рис. 8-5. Диаметр трубопровода следует принимать несколько меньшим $d_{\text{тр.мин}}$, соответствующего наименьшей длительности откачки, так как зависимости $t = f(d_{\text{тр}})$ имеют пологий минимум и длительность откачки возрастает незначительно при весьма существенном снижении массы трубопроводов.

Последовательность расчета трубопроводов предварительной откачки следующая (расчет целесообразно выполнять в табличной форме):

1. Задаются рядом диаметров трубопровода.

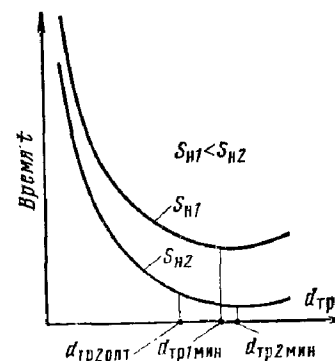


Рис. 8-5. Зависимость времени откачки t от диаметра трубопровода $d_{\text{тр}}$.

2. Рассчитывают объемы трубопровода для каждого из диаметров.

3. По формуле (8-19) определяют давление p_2 , устанавливающееся в системе после соединения откачиваемого объема с давлением p_i с трубопроводом, давление в котором было p_1 .

4. Разбивают диапазон давлений на участки от установившегося давления p_2 до конечного давления p_1 .

5. Для каждого из участков диапазона давлений определяют режим течения газа и среднее давление.

6. По соответствующим зависимостям гл. 6 определяют проводимости трубопровода для каждого из участков диапазона давлений при среднем давлении на участке.

7. Выбирают по данным каталогов типоразмеры насосов, откачивающих трубопровод. При этом целесообразно выбирать насос с быстротой действия, в 2—5 раз или несколько больше превышающей проводимость трубопровода.

8. По формулам (2-32), (2-35) или (8-29) для молекулярного режима течения газа рассчитывают длительность откачки в заданном диапазоне давлений для всего ряда диаметров трубопровода.

9. Выбирают оптимальный диаметр трубопровода в соответствии с приведенными выше рекомендациями.

8-6. ОТКАЧКА ДВУХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ОБЪЕМОВ

Задача определения времени, необходимого для достижения заданного давления в двух соединенных последовательно объемах (рис. 8-6), встречается довольно часто при расчете вакуумных систем оборудования для нанесения тонких пленок, электронно-лучевых установок, установок ионного легирования и т. п.

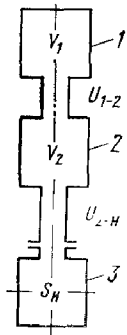


Рис. 8-6. Вакуумная система в виде двух последовательно соединенных объемов и насоса.

1, 2 — вакуумные объемы; 3 — насос.

Уравнения, описывающие изменение давления в объемах, имеют вид:

$$Q'_2 = Q'_1 + V_1 \frac{dp_1}{dt} = U_{1-2}(p_1 - p_2) + V_1 \frac{dp_1}{dt}. \quad (8-32)$$

При молекулярном режиме течения газа

$$\frac{dp_1}{dt} = -\frac{U_{1-2}}{V_1} (p_1 - p_2); \quad (8-33)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{U_{1-2}}{V_2} (p_1 - p_2) + \frac{U_{2-н}}{V_2} (p_2 - p_н); \quad (8-34)$$

$$S_н p_н = U_{2-н} (p_2 - p_н), \quad (8-35)$$

где p_1 , p_2 , $p_н$ — давления в объемах V_1 , V_2 и на входе в насос; U_{1-2} , $U_{2-н}$ — проводимости трубопроводов между объемами V_1 и V_2 и между объемом V_2 и насосом.

При молекулярном режиме течения газа решение этой задачи дается в следующем виде [75]:

$$p_1 = \frac{S_2 p_{нач1} - \frac{U_{1-2}}{V_1} (p_{нач2} - p_{нач1})}{S_2 - S_1} e^{S_1 t} + \frac{\frac{U_{1-2}}{V_1} (p_{нач2} - p_{нач1}) - S_1 p_{нач1} e^{S_2 t}}{S_2 - S_1}; \quad (8-36)$$

$$p_2 = \frac{S_2 p_{нач1} - \frac{U_{1-2}}{V_1} (p_{нач2} - p_{нач1})}{S_2 - S_1} \frac{V_0}{U_{1-2}} \left(\frac{U_{1-2}}{V_1} + S_1 \right) e^{S_1 t} + \frac{\frac{U_{1-2}}{V_1} (p_{нач2} - p_{нач1}) - S_1 p_{нач1}}{S_2 - S_1} \frac{V_0}{U_{1-2}} \left(\frac{U_{1-2}}{V_1} + S_2 \right) e^{S_2 t}, \quad (8-37)$$

где $p_{нач1}$ и $p_{нач2}$ — начальные давления в объемах 1 и 2 соответственно;

$$S_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{U_{1-2}}{V_1} + \frac{U_{1-2}}{V_2} + \frac{U_{2-н}}{V_2} \frac{S_{н1}}{U_{2-н} + S_{н1}} \right) \times \left[1 \pm \sqrt{1 - 4 \frac{\frac{U_{1-2} U_{2-н}}{V_1 V_2} \frac{S_{н1}}{U_{2-н} + S_{н1}}}{\left(\frac{U_{1-2}}{V_1} + \frac{U_{1-2}}{V_2} + \frac{U_{2-н}}{V_2} \frac{S_{н1}}{U_{2-н} + S_{н1}} \right)^2}} \right].$$

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

9-1. РАЗБОРНЫЕ ВАКУУМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Разборные вакуумные соединения относятся к числу наиболее ответственных узлов любой вакуумной системы. Это связано с тем, что потеря вакуумной плотности вакуумной системы чаще всего вызывается разгерметизацией разборного соединения.

При выборе конструкции разборного соединения для работы в конкретной вакуумной системе необходимо руководствоваться следующими характеристиками:

1) *натеканием*, т. е. количеством газа, протекающего в единицу времени в вакуумный объем между поверхностями уплотнителя и элементом соединения, а также за счет проницаемости газа через материал уплотнителя;

2) *газовыделением с поверхностей* уплотнителя и элементов соединения, соприкасающихся с вакуумным объемом;

3) *механической прочностью* соединения;

4) *термической стойкостью*, т. е. способностью выдерживать многократные нагревы и охлаждения без нарушения герметичности;

5) *химической стойкостью*;

6) *легкостью монтажа и демонтажа* соединения и степенью сложности его изготовления;

7) *простотой проверки герметичности*.

В разборных вакуумных соединениях в зависимости от предъявляемых требований к разрежению в вакуумной системе могут быть использованы как неметаллические, так и металлические уплотнители.

Разъемные соединения с неметаллическими уплотнителями. Соединения с неметаллическими уплотнителями (резинами) просты в изготовлении и надежны в эксплуатации, но имеют ограниченную термическую стойкость и, как правило, повышенное газовыделение уплотнителя, вследствие чего они чаще всего применяются в непрогреваемых вакуумных системах при давлениях не меньше $5 \cdot 10^{-5}$ Па.

При конструировании разборного соединения с неметаллическим уплотнителем необходимо руководствоваться следующими общими требованиями:

а) резиновый уплотнитель не должен воспринимать механические нагрузки и влиять на точность установки деталей;

б) для достижения вакуумной плотности соединения резиновый уплотнитель в зависимости от твердости материала должен быть сдеформирован по своей толщине на 20—40%;

в) резины практически несжимаемы, т. е. при деформации их объем остается постоянным. Поэтому сечение канавки под уплотнитель должно быть на 2—5% больше, чем сечение уплотнителя;

г) фланцы разъемного соединения рекомендуется затягивать до соприкосновения металлических поверхностей;

д) поверхность резинового уплотнителя, обращенная в вакуумную полость, должна быть сведена к минимуму.

Наиболее распространенные схемы соединений с резиновыми уплотнителями приведены в табл. 9-1.

Для уплотнения крупногабаритных элементов вакуумных установок нашла применение безболтовая конструкция (иногда называемая «гибким крылом»), показанная на рис. 9-1. Уплотнение крышки 2 с корпусом 1 осуществляется с помощью резинового уплотнителя круглого сечения ($\varnothing 10-15$ мм), закрепленного в держателях 5. Для получения надежной герметизации по периметру крышки 2 приварена окантовка 3, изготовленная из толстого полированного листа нержавеющей стали. Первоначальная наладка устройства состоит в том, что с помощью толкателей 8, поджатых пружинами 9, воздействуют на гибкую консоль 6 таким образом, чтобы уплотнитель 4 равномерно прилегал по всему периметру к окантовке 3. Толкатели размещены рав-

Принципиальные схемы соединений с резиновыми уплотнителями (допустимую рабочую температуру см. в табл. 13-1)

Номер схемы	Тип соединения	Форма канавки	Сечение детали		Примечание
			разобранное	сборное уплотненное	
1	Канавочное	Прямоугольная			Уплотнение осуществляется при смятии фланцев металл на металл. Для уплотнителя круглого сечения $B/d=0,72$, $A/d=1,15$. Для уплотнителя квадратного сечения со стороны С $B/C=0,75$, $A/C=1,4$. Применяется в системах среднего вакуума
2	Канавочное	Ступенчатая			Уплотнение осуществляется при смятии фланцев металл на металл. Для уплотнителя квадратного сечения со стороны С: $B/C=0,75$, $A/C=2,2$; $D/C=0,5$. Применяется в системах среднего вакуума
3	Канавочное	С фаской			Уплотнение осуществляется при смятии фланцев металл на металл. Для уплотнителя квадратного или круглого сечения $B/d=0,7-0,75$, $A/d=1,2-1,34$. Применяется в системах среднего вакуума

Продолжение таб. 91

Номер схемы	Тип соединения	Форма канавки	Сечение детали		Примечание
			разобранное	сборное уплотненное	
4	Канавочное	Скругленная угловая			Уплотнение осуществляется при смятии фланцев металл на металл. Для уплотнителя круглого сечения диаметра d $B/d=0,8$. Применяется в системах среднего вакуума
5	Канавочное	Трапециевидная			Для уплотнителя круглого сечения диаметра d $B/d=0,75-0,8$, $A/d=0,9$. Применяется в системах низкого и среднего вакуума
6	Канавочное	Фасочная			Уплотнение осуществляется при смятии фланцев металл на металл. Для уплотнителя круглого сечения диаметра d $B/d=0,82$. Применяется в системах среднего вакуума

Номер схемы	Тип соеди- нения	Форма канавки	Схема соединения		Примечание
			разборное	сборное уплот- нение	
7	Канавочные	Полукруг- лая			Уплотнитель—резиновый шланг. Уплотнение осуществляется при подаче давления (3—9) $\times 10^5$ Н/м ² в шланг. Применяется при большом перепаде уплотнения в системах низкого вакуума
8	Конусное	—			Уплотнитель круглого сечения диаметра $d \approx 1,32 d$. Применяется в системах среднего вакуума
9	Грибковое	—			Уплотнитель квадратного или прямоугольного сечения. Применяется для присоединения к вакуумным системам манометрических датчиков и трубопроводов диаметром до 18 мм

номерно по всему внешнему краю консоли примерно на расстоянии 200—250 мм друг от друга. Консоль 6 изготовлена из листовой стали толщиной 3 мм, приварена к корпусу 1 и снизу жесточена уголками 7.

При откачке камеры создается разрежение и в пространстве, ограниченном крышкой 2, уплотнителем 4 и консолью 6, вследствие чего под действием атмосферного давления происходит прижим крышки 2 к уплотнителю 4. За счет деформации консоли относительно корпуса 1 создается усилие уплотнения.

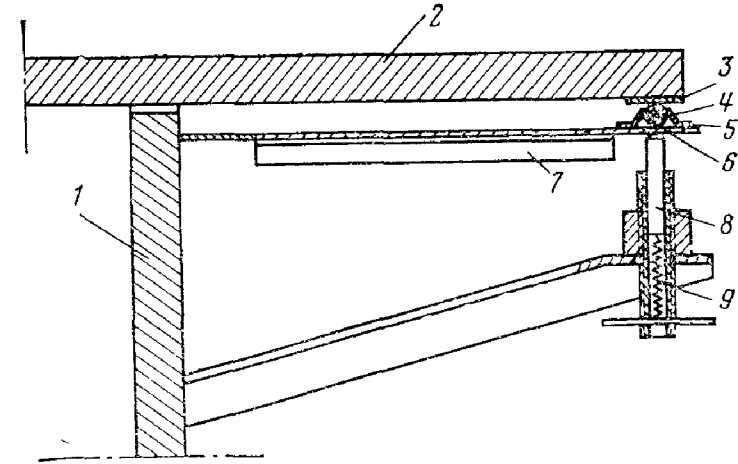


Рис. 91 Конструкция безболтового крупногабаритного соединения

Применение этой конструкции позволяет отказаться от точной и дорогостоящей слесарной обработки достаточно крупных деталей элементов уплотнения.

Разъемные соединения с металлическими уплотнителями. Соединения с металлическими уплотнителями предназначены для применения в прогреваемых вакуумных системах с давлением меньше $5 \cdot 10^{-5}$ Па и должны выдерживать длительные и многократные прогревы до температуры 600—900 К во время обезгаживания.

В конструкциях прогреваемых разъемных соединений уплотнение достигается за счет использования пластических деформаций уплотняющей металлической прокладки. При пластической деформации материал заполняет все имеющиеся на поверхности уплотняющих фланцев микронеровности. Вследствие того, что текучесть метал-

лов по сравнению с резинами невысока, необходимо уплотняющие поверхности фланцев изготавливать с малой шероховатостью. Для уплотнения соединения с металлической прокладкой требуются значительно большие удельные давления, чем в случае уплотнения с резиновой или фторопластовой прокладками.

Металлические уплотнительные прокладки практически исключают проникновение газов через материал уплотнителя, а газовыделение их примерно в 10^3 раза меньше, чем у лучших сортов вакуумных резин.

Схемы наиболее распространенных соединений с металлическими уплотнителями приведены в табл. 9-2.

Соединение с канавочно-клиновым профилем (схема 1 табл. 9-2) применяется в нашей стране для трубопроводов с диаметром условного прохода (ДУ) до 500 мм. Углы профиля канавки и клина делаются соответственно 60° и 90° , с тем чтобы уплотнение металлической прокладки происходило между кромкой канавки и конической поверхностью клина, благодаря чему значительно уменьшаются площадь прокладки, подвергающаяся деформации, а следовательно, и усилие, необходимое для надежного уплотнения. Поверхности профилей канавочно-клинового соединения должны иметь шероховатость не более 0,5 [2].

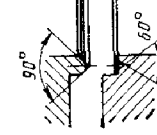
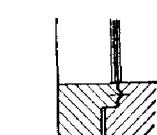

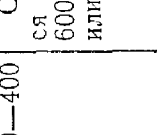
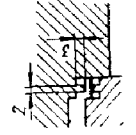
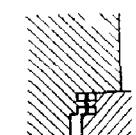
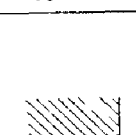
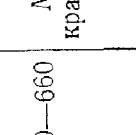
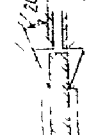

Уплотнители, изготовленные из алюминия, допускают прогрев до 600 К, так как при прогреве до более высокой температуры наблюдается диффузионная сварка уплотнителя с уплотняющими поверхностями. Толщина алюминиевого уплотнителя должна быть не более 0,5 мм из-за большого температурного коэффициента линейного расширения алюминия. Уплотнители, изготовленные из меди марки М1, допускают прогрев до 750—900 К.

В отечественной вакуумной технике в системах с давлением ниже $5 \cdot 10^{-5}$ Па, как правило, употребляется соединение с канавочно-клиновым профилем и медным уплотнителем.

С целью повышения надежности уплотнения и уменьшения уплотняющего усилия медные уплотнители подвергаются вакуумному или водородному отжигу при 1100 К в течение 5 мин. Иногда отжиг уплотнителя производят в восстановительном пламени газовой горелки с охлаждением в воде или на воздухе с последующим травлением и промывкой.

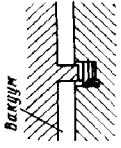
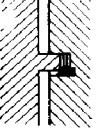
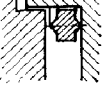
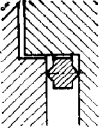
Таблица 9-2

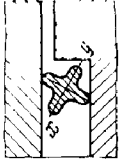
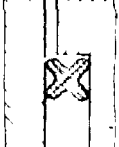
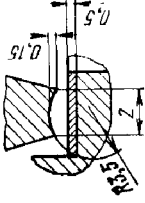

Принципиальные схемы соединений с металлическими уплотнителями

Номер схемы	Тип соединения	Уплотнитель	Схема соединения		Усилия герметизации, Н/мм ²	Примечание
			разобранное	собранные уплотнение		
1	Канавочно-клиновое	Медное плоское кольцо			330—400	Соединение может подвергаться многократному нагреву до 600 К (алюминиевый уплотнитель) или 750 К (медный уплотнитель)
		Алюминиевое плоское кольцо				
2	С выступами	Медное плоское кольцо			380—660	Может подвергаться многократному нагреву до 750 К
		Медное плоское кольцо				
3	С выступами	Медное плоское кольцо			240—300	Может подвергаться многократному нагреву до 800 К и охлаждению до температуры жидкого азота

Номер схемы	Тип соединения	Уплотнитель	Схема соединения		Усилие герметизации, Н/мм ²	Примечание
			разобранное	собранное уплотненное		
4	С выступающей	Свинцовое кольцо Ø 4—6 мм			25—20	Может подвергаться нагреву до 400 К
		Индиевое кольцо Ø 0,6—1,0 мм			6—7	
5	Ступенчатое	Медное кольцо Алюминиевое плоское кольцо			150—200 25,0—34,0	Может подвергаться многократному нагреву до 750 К

Номер схемы	Тип соединения	Уплотнитель	Схема соединения		Усилие герметизации, Н/мм ²	Примечание
			разобранное	собранное уплотненное		
6	Коническое	Медное кольцо Ø 1,0—1,25			150—200	Может подвергаться многократному нагреву до 750 К
7	Коническое	Медное плоское кольцо			500—600	Может подвергаться многократному нагреву до 1100 К и охлаждению до температуры жидкого азота
8	Угловое	Золотое кольцо Ø 0,25—0,75			100—500	Может подвергаться многократному нагреву до 1100 К и охлаждению до температуры жидкого азота

Номер схемы	Тип соедине- ния	Уплотнитель	Схема соединения		Усилие гермети- зации, Н/мм*	Примечание
			разобранное	собранное уплот- ненное		
9		Медное кольцо, вырезанное из трубы			500—600	Может подвергаться прогре- ву до 750 К
10	Плоское	Медное кольцо с двусторонними острыми кромками			350—450	Может подвергаться подогре- ву до 750 К

Номер схемы	Тип соеди- нения	Уплотнитель	Схема соединения		Усилие гермети- зации, Н/мм*	Примечание
			разобранное	собранное уплот- ненное		
11		Металлическое * кольцо фасонного сечения			350—500	В зависимости от материала прокладки могут подвергаться прогреву до 1200 К и охлаж- даться до температуры жидкого азота
12	Серповид- ное	Медное плоское кольцо			300—350	Может подвергаться прогреву до 750 К

* Усилие герметизации дано на 1 мм погонной длины уплотнителя.

Относительно тонкие фланцы соединения с канавочно-клиновым профилем имеют легко деформируемые компенсирующие пояса, препятствующие короблению фланцев при перепадах температуры во время их прогрева. Эти же пояса дают возможность приваривать окончательно обработанные фланцы к корпусам или трубам, так как все поводки, возникающие при сварке, либо гасятся на этих поясах, либо свободно выбираются при стягивании фланцев часто поставленными стяжными шпильками.

Существенными недостатками этого типа соединений являются сложность контроля номинальных размеров уплотняющих фланцев и возможность возникновения воздушных карманов в зоне контакта, которые при определенных сочетаниях размеров уплотняющих профилей могут стать источниками медленного натекания в вакуумную систему. К недостаткам соединения этого типа следует также отнести значительную металлоемкость, большие габариты и необходимость применения большого количества стяжных шпилек.

Соединение с выступами по схеме 2 табл. 9-2 значительно проще в изготовлении, чем соединение с канавочно-клиновым профилем, но требует вдвое больших усилий для уплотнения, а медная уплотнительная прокладка в этом случае подвергается более интенсивной коррозии при обезгаживании соединения, так как поверхность, открытая на атмосферу, в этом случае значительно больше, чем в соединении по схеме 1 табл. 9-2.

Фланцевое соединение, выполненное по схеме 3 табл. 9-2, допускает многократный прогрев до температуры 800 К и охлаждение до температуры жидкого азота и не дает заметного натекания при давлениях ниже 10^{-10} Па. При внедрении конических кромок в плоское медное кольцо происходит холодное течение материала прокладки к внутренним цилиндрическим поверхностям фланцев. Так как дальнейшее течение материала прокладки из зоны уплотнения жестко ограничено, создаются высокие давления между уплотняющими поверхностями, вследствие чего происходят заполнение всех микронеровностей и надежное уплотнение соединения. Толщина медной уплотняющей прокладки обычно около 2 мм.

Преимуществом данного типа уплотнения является то, что конические уплотняющие поверхности находятся

в углублении, благодаря чему снижается вероятность их повреждения. Для обеспечения уплотнения достаточно сравнительно небольшой деформации медной прокладки. Оба фланца имеют одинаковую геометрию, что снижает их стоимость и обеспечивает взаимозаменяемость. Габариты и металлоемкость соединения в 1,5—2 раза меньше, чем конструкции, выполненной по схеме 1 табл. 9-2. Подобная схема уплотнения нашла применение для фланцев с условным проходом от 63 до 260 мм.

Соединение по схеме 4 табл. 9-2 со свинцовым или индиевым кольцом в качестве уплотнителя требует для стягивания значительно меньших усилий, чем в случае медных и алюминиевых уплотнителей, но допускает прогрев всего лишь до 400 К.

Индиевые уплотнители изготавливаются из проволоки диаметром от 0,6 до 1 мм. Индий достаточно надежно уплотняет не только металлические детали, но и такие материалы, как стекло и керамика. В конструкции соединения по схеме 4 табл. 9-2 индиевая проволока раздавливается и заполняет канавку и зазоры между стыкуемыми поверхностями. Шероховатость стыкуемых поверхностей зуба и канавки должна быть не более 2 мкм. Толщина индия между стыкуемыми поверхностями составляет 0,015—0,02 мм.

В ступенчатом соединении по схеме 5 табл. 9-2 уплотнителем является отоженная медная прокладка, которая при уплотнении срезается кромками фланцев на половину своей первоначальной толщины. Этот вид уплотнения прост в изготовлении и легко подвергается восстановлению после повреждения за счет проточки по торцевой поверхности.

Уплотнение конического соединения (схема 6 табл. 9-2) осуществляется за счет пластического течения материала вследствие больших сил трения. В качестве уплотнителя чаще всего применяют медную отоженную проволоку диаметром 1—1,25 мм, а иногда плоское медное кольцо толщиной 0,12—0,25 мм (схема 7 табл. 9-2). При затяжке фланцев силы трения, возникающие на поверхности уплотнителя и фланцев, разрушают пленку окислов и другие поверхностные загрязнения, создавая тем самым условия для местной сварки чистых металлических поверхностей.

Экспериментально установлено, что оптимальный угол конуса для уплотнителя из медного кольца кругло-

го сечения должен быть равен 30° , а для плоского кольца — 20° .

Уплотнения конусного типа нашли применение для фланцевых соединений с условным проходом до 300 мм. Основные преимущества соединения состоят в отсутствии закрытых воздушных карманов, легкости контроля всех геометрических размеров уплотняющего профиля, в простоте изготовления уплотнителя и в относительно небольших усилиях герметизации. Соединение может надежно работать и выдерживать температурные циклы даже после снятия герметизирующего усилия с фланцев.

Однако отсутствие у фланцев конического соединения посадочных мест и плоских стыковочных поверхностей требует строгого монтажа соединения с тем, чтобы не допустить перекосов и нарушения схемы деформации уплотнителя. Следует также заметить, что надежность соединения резко снижается при неравномерном нагреве или охлаждении стягивающих фланцев. Так, если температура фланца с охватывающим конусом окажется выше температуры ответного фланца, то соединение будет стремиться как бы «открыться», что приведет к его разуплотнению.

Герметичность соединения по схеме 8 табл. 9-2 достигается за счет смятия золотой или медной проволоки диаметром 0,25—0,75 мм в углу уступа, образуемого стягивающими фланцами, при этом степень деформации проволоки должна составлять 50—60%. Для надежной герметизации необходимо строго выдерживать определенный радиальный зазор между посадочными местами фланцев, который обычно равен 0,025—0,125 мм [73]. Подобная конструкция соединения показана на рис. 9-6.

Соединение по схеме 9 табл. 9-2 допускает прогрев до 750 К. В качестве уплотнителя используется медное кольцо трапецеидального сечения, вырезанное из трубы. Такие соединения нашли применение для трубопроводов с диаметром условного прохода до 50 мм.

Соединение с кольцом с двусторонними острыми кромками по схеме 10 табл. 9-2 применяется в том случае, когда желательно иметь гладкие поверхности уплотняющих фланцев. Это соединение может быть применено в конструкциях с диаметром условного прохода до 1000 мм.

Вариантом схемы 10 табл. 9-2 является соединение с уплотнителем в виде кольца с фасонным сечением (схема 11 табл. 9-2) [100]. Уплотнитель этого соединения имеет в сечении крестообразную форму, и его ось x и y образует в ненапряженном состоянии некоторый угол к уплотняющим поверхностям. При стягивании уплотняющих фланцев происходит «закручивание» уплотнителя, который переходит в напряженное состояние, причем уплотнение при этом осуществляется по двум его кромкам. Однако сложность профиля уплотнителя и наличие большого воздушного кармана резко снижают возможность широкого использования данной конструкции.

Вариантом схемы 10 табл. 9-2 является соединение с медной отожженной проволокой в качестве уплотнителя [2]. Этот тип соединения нашел применение при уплотнении очень больших отверстий (с условным проходом от 260 до 1500 мм) или отверстий некруглой формы. Для удобства монтажа длина уплотнительной проволоки выбирается на несколько миллиметров меньше расчетного периметра уплотнителя. Концы проволоки соединяются стыковой сваркой и тщательно зачищаются. Чтобы проволока удерживалась в момент затяжки соединения, в одном из фланцев предусматривают так называемые «исчезающие» элементы, на которые устанавливают уплотнитель (рис. 9-2).

Так, в случае уплотнения отверстия прямоугольной формы такими элементами могут быть штыри, расположенные в углах прямоугольника и выступающие над плоскостью уплотнения. Отверстия под штыри делаются несколько глубже, чем длина штырей, с тем чтобы при затяжке фланцев штыри могли утопиться.

В конструкции соединения, выполненного по схеме 12 табл. 9-2, с целью расширения технологических допусков на изготовление фланцев применено так называемое «серповидное» уплотнение [2]. При затяжке фланцев выступ с «серповидным» сечением врезается в плоский уплотнитель. При этом часть уплотнителя оказывается запертой в ограниченном объеме «серповидной» выточки и, не имея возможности растекаться, заполняет все микронеровности вогнутого профиля, за счет чего достигается надежное уплотнение. Уплотнение плоской поверхности ответного фланца также весьма надежно, так как силы, действующие в зоне контакта нормально к поверх-

ности «серповидного» профиля, как бы концентрируются на узком участке плоской поверхности, создавая кумулятивность действия.

«Серповидное» уплотнение разработано для соединений с условным проходом от 10 до 225 мм. Уплотнители изготавливаются из меди или никеля толщиной 0,3—0,5 мм. Выгодным отличием этого типа соединения от

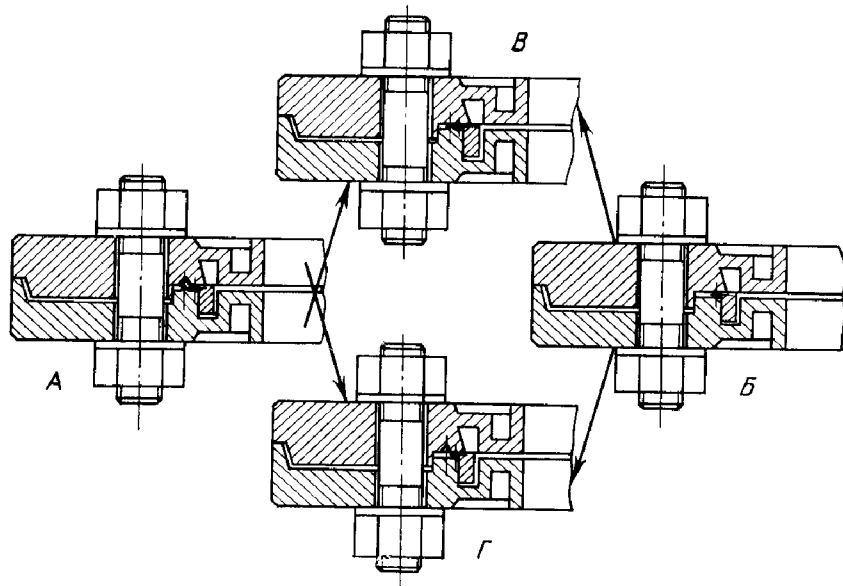


Рис. 9-2. Уплотнение крупногабаритного соединения проволочным уплотнителем.

других устройств, использующих медный уплотнитель, является то, что в нем уплотнитель может быть использован многократно, для чего каждый раз его переворачивают на другую сторону.

Металлические уплотнения хорошо работают лишь при близких температурных коэффициентах линейного расширения всех элементов соединения, мало отличающихся температурах стягивающих фланцев и отсутствии их коробления.

9-2. ЭЛЕМЕНТЫ СОЕДИНЕНИЙ ВАКУУМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

При проектировании вакуумных установок следует уделять особое внимание трубопроводам и элементам их соединений.

Геометрические размеры трубопроводов должны быть выбраны таким образом, чтобы по возможности эффективнее использовались применяемые средства откачки.

Трубопроводы должны обладать необходимой механической прочностью, химической стойкостью и малым газовыделением с вну-

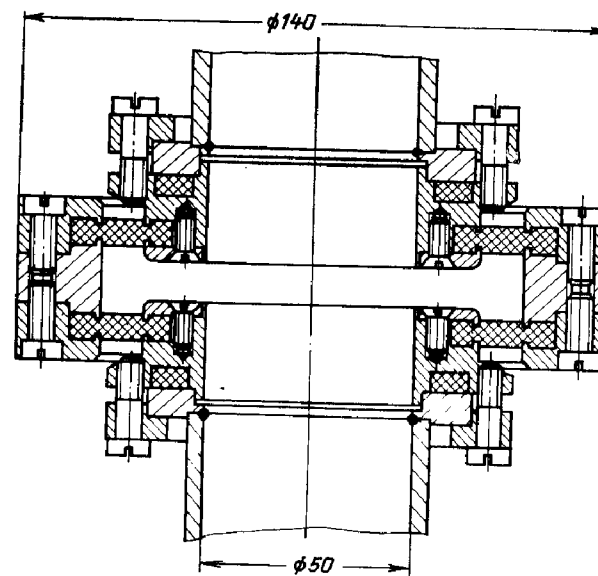


Рис. 9-3. Гибкое звено с резиновыми мембранами.

тренних поверхностей. В отдельных случаях трубопроводы должны допускать многократный нагрев с целью их обезгаживания.

Коммутирующие трубопроводы чаще всего изготавливаются из стекла или металлических бесшовных цельнотянутых труб. Трубопроводы могут также изготавливаться из кварцевых, керамических, резиновых и синтетических материалов.

Тонкостенные синтетические трубопроводы для обеспечения механической прочности армируются металлической проволокой.

Соединения отдельных частей трубопроводов производятся сваркой, пайкой или с помощью шлифов и фланцев.

Уплотнение фланцевых соединений обычно осуществляется по одной из схем, приведенных в табл. 9-1 и 9-2.

Часто при соединении длинных трубопроводов и подключении средств откачки элемент соединения служит также гибким звеном, исключаящим передачу вибраций на вакуумную установку и компенсирующим неточность сборки и монтажа оборудования.

Фланцевое соединение трубопроводов, исключаяющее передачу вибраций и компенсирующее неточность сборки и монтажа, показано на рис. 9-3. Две резиновые мембраны играют роль компенсирующего звена и одновременно являются уплотнительными элементами соединения.

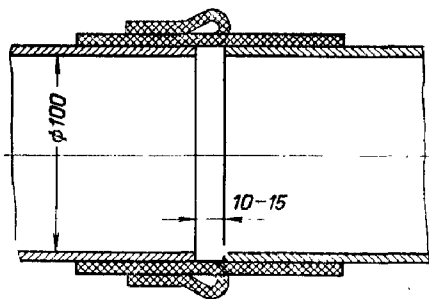


Рис. 9-4. Гибкое звено с резиновой манжетой.

Достаточно просто осуществляется гибкое соединение длинных металлических трубопроводов с помощью резиновой манжеты, как это показано на рис. 9-4. Резиновая манжета может изготавливаться из плоской резины и соединяться в кольцо методом горячей вулканизации с последующей шлифовкой внутренней поверхности.

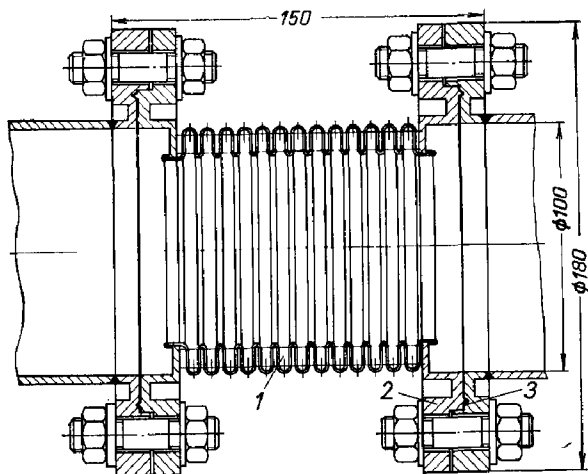
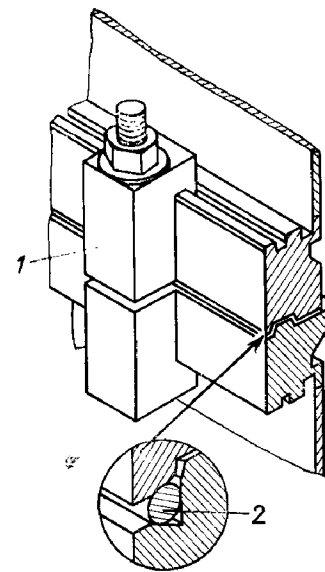


Рис. 9-5. Прогреваемое гибкое звено.

Внутренний диаметр манжеты обычно делается на 10—15 мм меньше наружного диаметра трубопровода.

Надежное уплотнение соединения достигается при посадке манжеты на концы трубопроводов с помощью клея 88-Н (МРТУ-38-5-880-66).

Рис. 9-6. Уплотнение соединения с помощью струбицы.



Прогреваемые высоковакуумные трубопроводы соединяются гибким звеном (рис. 9-5), состоящим из металлического шильфона 1, приваренного к двум фланцам 2. Уплотнение гибкого звена в этом случае производится с помощью медного или алюминиевого уплотнителя 3.

Для трубопроводов с большими наружными диаметрами уплотняющие фланцы получаются достаточно громоздкими. На рис. 9-6 показано соединение с металлическим уплотнителем, в котором с целью уменьшения уплотнительных фланцев применены струбицы 1. Уплотнителем может быть медная круглая проволока 2 либо кольцо круглого сечения из синтетического материала. Фланцевые соединения такой конструкции применяются для трубопроводов с наружным диаметром от 260 до 630 мм.

9-3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ ВВОДЫ

Для введения электрической энергии внутрь вакуумного объема обычно используют электрические вводы, которые герметично присоединяются к системе и электрически изолируются от нее.

В зависимости от рабочего напряжения, силы тока, частоты, допустимой рабочей температуры и других условий эксплуатации электрические вводы могут быть подразделены на три основные группы: *низковольтные низкочастотные, высоковольтные низкочастотные и высокочастотные.*

В свою очередь вводы каждой группы могут быть разборными и неразборными, прогреваемыми и непрогреваемыми.

Площадь поперечного сечения электрического ввода выбирается такой, чтобы плотность тока не превышала $(3-5) \times 10^6 \text{ А/м}^2$, для углеродистой стали $7 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$, для алюминия — $2,0 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$, для никеля $8 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$, для молибдена — $1,5 \times 10^6 \text{ А/м}^2$ и нержавеющей стали 12Х18Н10Т — $1 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$.

Низковольтные вакуумные вводы (до 250 В) в свою очередь делятся на *сильноточные и слаботочные.* Сильноточные вводы служат в основном для подвода электроэнергии к нагревательным элементам, расположенным внутри откачиваемого объема. Для исключения нагрева свыше допустимой температуры сильноточные вводы охлаждаются водой. Практически вводы, предназначенные для пропускания тока свыше 100 А, должны иметь водяное охлаждение. Стенка вакуумного объема, граничащая с вводом, предназначенным для пропускания переменного тока, также должна

охлаждаться водой, так как в ней выделяется значительное количество тепла. Плотность тока в месте контакта токоподвода и ввода должна быть не более $2 \cdot 10^6$ А/м², а в случае, если токоподвод тоже охлаждается водой, допустимая плотность тока может быть увеличена до $5 \cdot 10^6$ А/м².

Следует отметить, что при одинаковых расчетных площадях поверхности контакта фактическая плотность тока будет разной в зависимости от чистоты обработки контактирующих поверхностей, степени их загрязнения и удельного давления в месте контакта.

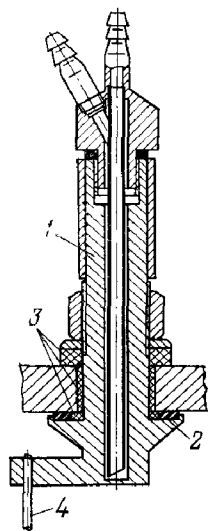
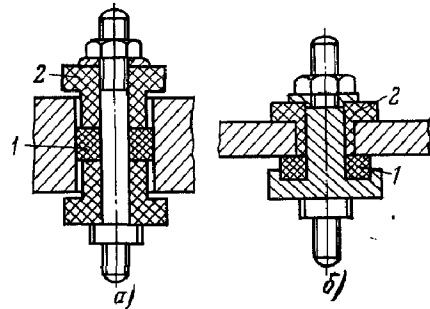


Рис. 9-7. Сильноточный вакуумный ввод с водяным охлаждением.

1 — медный стержень; 2 — резиновый уплотнитель; 3 — изоляционные кольца; 4 — нагреватель.

Рис. 9-8. Низковольтные слаботочные вводы.

а — соединение с закрытым уплотнителем; б — соединение с уплотнителем, расположенным снаружи; 1 — резиновый уплотнитель; 2 — втулка из керамики или другого электроизоляционного материала.



На рис. 9-7 изображен сильноточный ввод, применяемый в прогрееваемых вакуумных системах с давлением не ниже $5 \cdot 10^{-5}$ Па. Низковольтный слаботочный ввод с резиновым уплотнителем показан на рис. 9-8.

В прогрееваемых высоковакуумных системах используется ввод, изображенный на рис. 9-9.

Слаботочный ввод, изображенный на рис. 9-10, удобен для вывода концов термопары из вакуумного объема, так как в этом случае соединения компенсационных проводов с термопарой находятся вне вакуумной полости. Такая конструкция обосновывается еще и тем, что все контакты, находящиеся внутри объема, неизбежно подвергаются нагреву за счет теплоизлучения. При этом образуется паразитная э. д. с., вносящая существенные ошибки в показания термопары. Вынесение места соединения компенсационных проводов с термопарой из области, подвергающейся теплоизлучению, т. е. из вакуумного объема, устраняет эти ошибки. Проводник 1 уплотняется резиновым уплотнителем 2. Корпус ввода изолирован от стенки вакуумной камеры изоляционными втулками 3 и уплотнен резиновым уплотнителем 5, деформация которого ограничена керамическим кольцом 4.

Высоковольтные вакуумные вводы применяются при напряжениях свыше 250 В, а также при необходимости исключить утечки в измерительных цепях.

Вакуумный ввод с малыми электрическими утечками изображен на рис. 9-11. Металлический стержень 1 изолируется и уплотняется фторопластовой втулкой 3. Усилие уплотнения втулки с корпусом создается при затяжке гнезда 2. Втулка должна иметь достаточные размеры изолирующей поверхности, с тем чтобы исключить утечки. Тем не менее высоковольтные вводы лучше всего изготовлять с использованием керамических изоляторов, как показано на рис. 9-9.

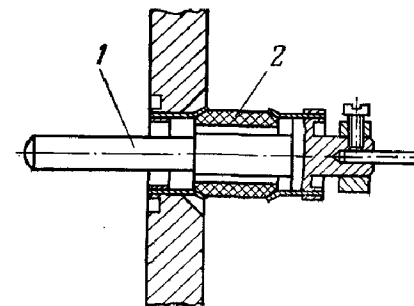


Рис. 9-9. Прогреваемый электрический ввод для сверхвысоковакуумных систем.

1 — стержень; 2 — металлокерамический изолятор.

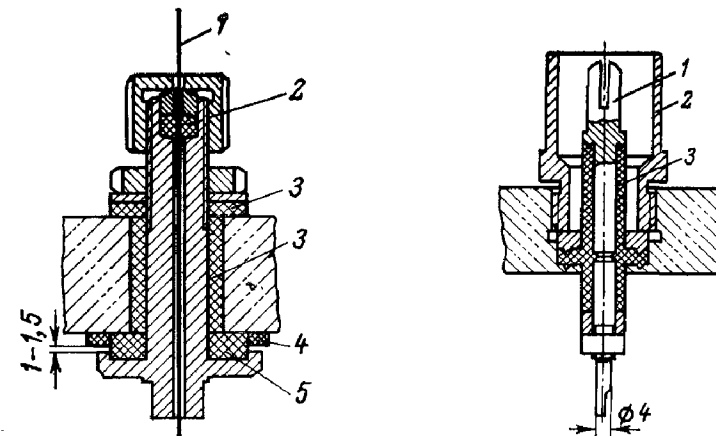


Рис. 9-10. Вакуумный ввод для термопар.

Рис. 9-11. Высоковольтный вакуумный ввод.

В случае напряжений, больших 1500 В, керамический изолятор делается ребристым для увеличения протяженности изолирующей поверхности.

Высокочастотные вакуумные вводы чаще всего применяются для подвода тока высокой частоты (свыше 1500 Гц) от высокочастотного генератора к индуктору, помещенному в вакуумном объеме. Высокочастотные вводы для уменьшения потерь

высокочастотной энергии, как правило, выполняются коаксиальными и охлаждаются водой.

Кроме электрических вводов, рассмотренных выше, в вакуумных системах достаточно широко применяют различные вводы, выполненные с использованием вакуумно-плотных спаев стекла с металлом [39].

9-4. СМОТРОВЫЕ ОКНА (ИЛЛЮМИНАТОРЫ)

Для визуального наблюдения за процессами, происходящими в вакуумных камерах, обычно используют смотровые окна, или иллюминаторы.

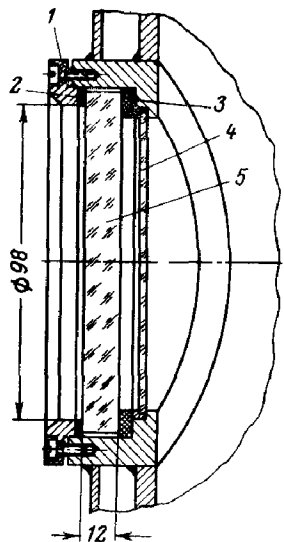


Рис. 9-12. Смотровое окно с резиновым уплотнителем.

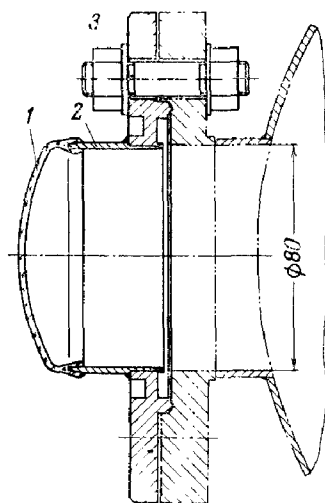


Рис. 9-13. Смотровое окно для сверхвысоковакуумной системы.

Часто иллюминаторы необходимы для пропускания излучения из окружающего пространства внутрь рабочей камеры или, наоборот, изнутри рабочей камеры наружу.

При давлениях выше $5 \cdot 10^{-5}$ Па широко применяются смотровые окна с резиновыми уплотнителями. Одна из конструкций такого смотрового окна показана на рис. 9-12. Полированный стеклянный диск 5 с помощью нажимного кольца 1 через мягкую прокладку 2 прижимается к резиновому уплотнителю 3. Толщина h стеклянного диска в зависимости от диаметра свободной поверхности диска D выбирается в пределах $h = (0,1 \div 0,2)D$, причем для больших диаметров берется относительно меньшая толщина.

Для предохранения внутренней поверхности стеклянного диска от напыления иногда ставится защитное стекло 4, которое периодически заменяется. В некоторых конструкциях, особенно связанных с интенсивным распылением, применяются защитные металлические

заслонки, отводимые на короткие промежутки времени. В конструкциях с поворотными дисками с набором защитных стекол и светофильтров применяются специальные механические щетки, которые очищают защитные стекла и светофильтры от напыляемого слоя.

В высоковакуумных установках для нанесения тонких пленок нашли применение перископы. Для увеличения обзора внутреннее зеркало перископа делается поворотным. Попадание распыляемого вещества на внутреннее зеркало перископа не затрудняет наблюдение, так как отражательные свойства зеркала при этом меняются незначительно.

С целью защиты смотровых окон от напыления и теплового излучения также применяют быстро вращающиеся диски с прорезями. При этом интенсивность напыления снижается пропорциональ-

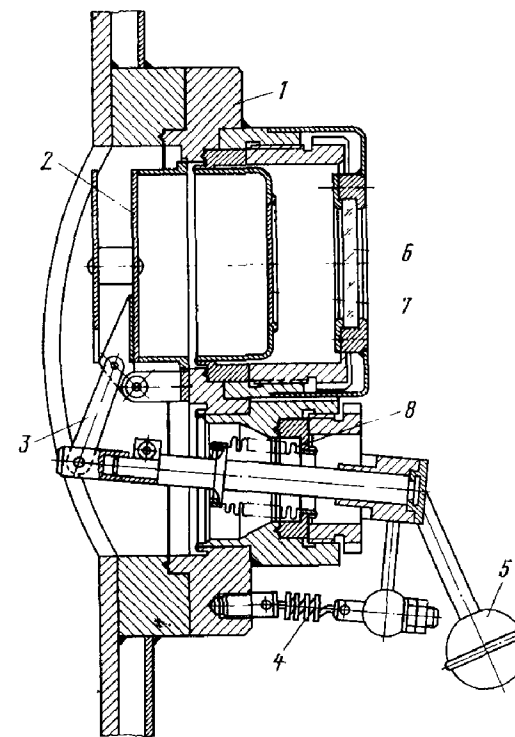


Рис. 9-14. Смотровое окно с защитным экраном.

1 — фланец; 2 — защитный тепловой экран; 3 — рычажная система; 4 — пружина; 5 — рукоятка; 6 — наружный защитный иллюминатор; 7 — смотровое окно; 8 — металлический щиток.

но отношению длины окружности с радиусом, равным расстоянию от оси вращения диска до середины окна, к ширине паза. При частоте вращения диска более 1500 об/мин достигается хорошая видимость через окно.

В установках со сверхвысоким вакуумом употребляются смотровые окна без резиновых уплотнителей, как показано на рис. 9-13. Стеклоклянный колпак 1 припаян к коваровому стакану 2, сваренному

в свою очередь с фланцем 3 из нержавеющей стали. Фланец уплотняется с вакуумным объемом через металлический уплотнитель. Для предохранения от разрушения соединения стекла с металлом при затяжке металлического уплотнения необходимо предусматривать разгрузочные канавки. Смотровые окна подобной конструкции допускают прогрев до 600—750 К.

Другим конструктивным решением смотрового окна, также предназначенного для сверхвысоковакуумной системы, является устройство с защитным тепловым экраном, показанное на рис. 9-14.

Для наблюдения за объектом и его пирометрирования защитный экран 2 с помощью рычажной системы 3 поворачивается на некоторый угол, при этом пружина 4 растягивается. После снятия усилия с рукоятки 5 экран 2 возвращается на место.

9.5. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДВИЖЕНИЯ В ВАКУУМНЫЙ ОБЪЕМ

Возможность использования того или иного ввода движения в значительной степени определяется конструкцией уплотнения элемента, передающего движение в вакуумный объем. Конструкция уплотнения определяет диапазон рабочих температур и давлений, максимально возможную передаваемую нагрузку, максимально допустимые скорость и перемещение ведомого звена в вакууме, кинематическую точность, срок службы и другие параметры ввода [55, 57].

В зависимости от конструкции уплотнительного элемента вводы движения могут быть разбиты на три группы:

1. Вводы движения с *контактным уплотнительным элементом*.
2. Вводы движения с *деформируемым уплотнительным элементом*.
3. Вводы движения с *неподвижным уплотнительным элементом*.

В вводах с контактными уплотнительными элементами движущееся звено, передающее нагрузку, имеет постоянный механический контакт с неподвижным уплотнителем, размещенным в корпусе устройства.

В табл. 9-3 приведены основные схемы конструкций вводов с *контактным уплотнительным элементом*.

В лабораторной практике нашли применение вводы движения с жидкостными затворами (схема 1 табл. 9-3).

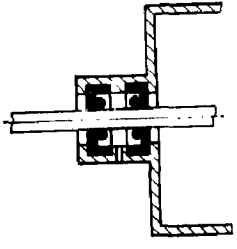
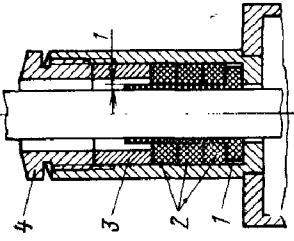
В качестве уплотняющей жидкости чаще всего применяют легкоплавкие металлы с низкой упругостью паров (галлий, олово, свинец, висмут и др.) [46, 57] или органические жидкости и ртуть, которую заливают в глу-

Таблица 9-3

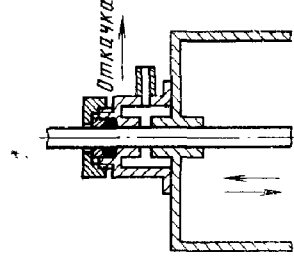
Вводы движения с контактными уплотнительными элементами

Номер схемы	Наименование ввода движения	Схема конструкции	Диапазон рабочих давлений, Па	Максимальная температура прогрева, К	Виды передаваемого движения	Скорость и перемещение в вакууме, м/с; л, об/мин; L, м
1	С жидкостным затвором		$10^{-5} - 10^{-7}$	Зависит от свойств уплотняющей жидкости	Вращательное, поступательное, качательное, комбинированное	$n = 3000$ L — незначительное
2	С уплотнителем в виде прокладок (уплотнение Вильсона)		$10^{-3} - 10^{-5}$	Зависит от материала уплотнителя (см. табл. 13-1)	Вращательное, поступательное	$v = 0,5$ L — незначительное

Продолжение табл. 9-3

Номер схемы	Наименование ввода движения	Схема конструкции	Диапазон рабочих давлений, Па	Максимальная температура прогрева, К	Виды передаваемого движения	Скорость и перемещение в вакууме, v , м/с; n , об/мин; L , м
3	С резиновыми армированными манжетами		$10^{-2} - 10^{-5}$	Зависит от материала уплотнителя (см. табл. 13-1)	Вращательное	$v = 10$
4	С самосмазывающимся уплотнителем		$10^{-3} - 10^{-5}$	450	Вращательное	$n = 1500 \div 3000$

Продолжение табл. 9-3

Номер схемы	Наименование ввода движения	Схема конструкции	Диапазон рабочих давлений, Па	Максимальная температура прогрева, К	Виды передаваемого движения	Скорость и перемещение в вакууме, v , м/с; n , об/мин; L , м
5	С щелевым и контактным уплотнением		$10^{-5} - 10^{-7}$	700—1000 при охлаждении контактного уплотнителя	Вращательное, поступательное, комбинированное	$v = 10$

При выборе 1. Все виды движения с контактным уплотнением обеспечивают жесткую кинематическую связь.
2. Максимальный передаваемый момент вводится определяется прочностью сепаратора звена.

бокую кольцевую проточку в корпусе 1 (см. схему 1 табл. 9-3). К вращающемуся валу 2 приварен стакан 3, нижний торец которого погружен в жидкость. Для сокращения высоты жидкостного затвора необходимо уменьшить разность давлений внутри и снаружи стакана. В данной конструкции это достигается применением дополнительного уплотняющего резинового коль-

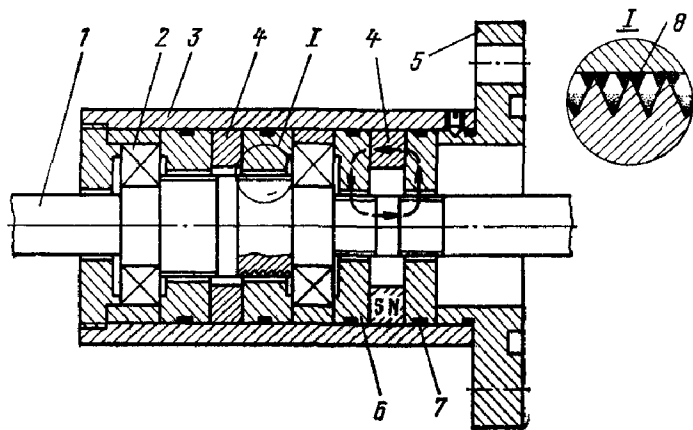


Рис. 9-15. Ввод вращения с уплотнением магнитной жидкостью.
1 — вал; 2 — шарикоподшипник; 3 — корпус; 4 — постоянные магниты; 5 — соединительный фланец; 6 — полюсный наконечник; 7 — синтетический уплотнитель; 8 — магнитная жидкость.

ца 4 и откачкой пространства над ртутью до давления примерно 10^2 Па, осуществляемой механическим вакуумным насосом через штуцер 5. Эта конструкция ввода наряду с передачей вращения позволяет совершать небольшие возвратно-поступательные перемещения, величина которых ограничивается глубиной погружения стакана в жидкость. Наибольшая частота оборотов вала лимитируется тем, что ртуть увлекается вращающимся стаканом, вследствие чего происходит нарушение герметичности жидкостного затвора [73].

В зарубежной практике нашла применение весьма перспективная конструкция контактного ввода движения, показанная на рис. 9-15, в которой в качестве уплотняющей жидкости используется коллоидный раствор со взвешенными в нем магнитными частицами размером до 10 нм. Этот ввод может работать в диапазоне температур от 230 до 400 К в вакууме до 10^{-5} Па и передавать вращение с частотой до 120 000 об/мин.

Вал 1 вращается в двух шарикоподшипниках 2, установленных в корпусе 3. Уплотнение вращающегося вала имеет две магнитные системы, состоящие из постоянных магнитов 4 и двух пар полюсных наконечников 6. Магнитные системы уплотняются с корпусом ввода с помощью синтетических уплотнителей 7. На поверхности вала 1 против полюсных наконечников образованы кольцевые канавки треугольного сечения с шагом примерно 1 мм.

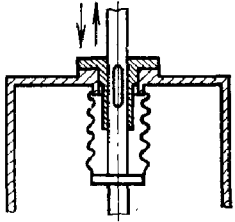
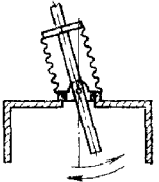
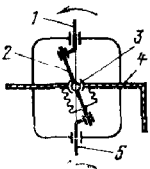
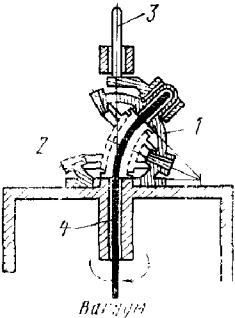
Магнитные системы фокусируют и направляют магнитный поток таким образом, чтобы он пересекал зазор между вращающимся валом и неподвижными полюсными наконечниками. Этот зазор обычно не превышает 0,05—0,08 мм. Под действием магнитного поля магнитная жидкость 8 собирается вокруг вершин кольцевых выступов вала, т. е. в местах, где напряженность магнитного поля наибольшая. При этом образуются герметизирующие перемычки из магнитной жидкости, которые весьма надежно уплотняют вращающийся вал даже при относительно больших перепадах давления, ударах и вибрации.

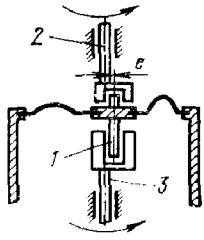
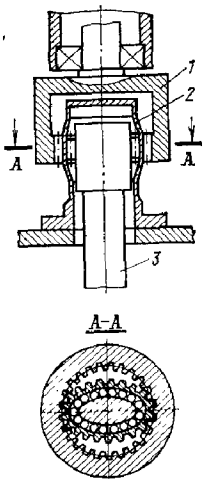
Уплотнительные элементы в конструкциях по схемам 2, 3 табл. 9-3 изготавливаются из маслостойкой вакуумной резины. Надежная работа устройства может быть обеспечена лишь при полированной поверхности вала и тщательном изготовлении резиновых колец. Особое внимание следует обращать на качество изготовления внутренних кромок резиновых колец. Между резиновыми кольцами заливается вакуумное масло. Устройства требуют частой ревизии и поэтому должны быть расположены в удобных для обслуживания местах.

Ввод движения, выполненный по схеме 4 табл. 9-3, с фторопластовой втулкой не требует смазки, что выгодно его отличает от вводов по схемам 2, 3 табл. 9-3. Так как фторопласт-4 менее упруг, чем резина, и имеет значительную остаточную деформацию, для компенсации износа и обеспечения плотного контакта уплотняющей фторопластовой втулки 1 с подвижным полированным валом 5 используются упругие свойства резиновых колец 2, предварительно деформированных с помощью нажимной гайки 4 и втулки 3.

В ряде сверхвысоковакуумных установок нашли применение вакуумные вводы движения с промежуточной откачкой, выполненные по схеме 5 табл. 9-3.

Вводы движения с деформируемым уплотнительным элементом

Номер схемы	Наименование ввода движения	Схема конструкции	Диапазон рабочих давлений, Па	Максимальная температура прогрева, К	Вид уплотнителя	Частота вращения и величина перемещения n , об/мин, L , м	Кинематическая жесткость	Максимальный передаваемый момент, Н·м
1	Ввод поступательного движения		10^{-3} — 10^{-5} 10^{-5} — 10^{-8}	350—450 450—1000	а) Резиновая мембрана б) Металлический сильфон	$L = 10\%$ диаметра мембраны $L = 0,7$ и более	Жесткая связь То же	Определяется прочностью силового звена
2	Ввод качательного движения		10^{-3} — 10^{-5} 10^{-5} — 10^{-8}	350—450 (см. табл. 13-1) 450—1000	а) Резиновая мембрана б) Металлический сильфон	$\alpha = 10 ; 20^\circ$	То же То же	150, определяется прочностью подшипникового узла
3	Ввод вращения с пространственным шарниром		10^{-3} — 10^{-5} 10^{-5} — 10^{-8}	350—450 (см. табл. 13-1) 450 — 1000	а) Резиновая мембрана б) Металлический сильфон	n до 100 L до 0,1 n до 500 L до 0,03 на один сильфон	Зависит от конструкции То же	Определяется прочностью звеньев, находящихся в вакууме 3
4	Ввод вращения с разгрузкой гибкого уплотнительного элемента		10^{-5} — 10^{-7}	450—1000	Металлический сильфон	n до 500	То же	Более 200

Номер схемы	Наименование ввода движения	Схема конструкции	Диапазон ра- бочих давле- ний, Па	Максимальная температура прогрева, К	Вид уплотни- теля	Частота вращения и величина пере- мещения L , об/мин, L , м	Кинематическая жесткость	Максимальный передаваемый момент, Н·м
5	Ввод вращения с промежуточ- ным звеном, совершающим плоскопараллельное движе- ние		10^{-2} — 10^{-5} 10^{-5} — 10^{-9}	350—450 (см. табл. 13-1) 450—1000	а) Резиновая мембрана б) металличе- ский сильфон	n до 100	Зависит от конструкции	3
6	Ввод вращения с использова- нием волновой передачи		10^{-5} — 10^{-9}	450—800	Металличе- ская гибкая оболочка	n до 500 L может быть значительной	То же	До 150

Уплотнение вала в перегородке, отделяющей камеру с промежуточным давлением от атмосферы, изготовлено в виде сальника. Уплотнение вала в стенке, отделяющей рабочую полость от полости с промежуточным давлением, осуществляется за счет малых зазоров между валом и корпусом.

Схемы конструкций вводов движения с деформируемым уплотнительным элементом приведены в табл. 9-4.

В вводах движения с деформируемым уплотнительным элементом движущееся звено связано с гибким герметичным уплотнителем, закрепленным в неподвижном

корпусе устройства и деформирующимся во время работы ввода.

Для надежной и долговечной работы вакуумных вводов движения необходимо, чтобы герметизирующий элемент не воспринимал передаваемые устройством усилия. Направляющие и опоры устройства желательно помещать вне вакуумной полости ввиду больших коэффициентов трения в вакууме.

Вводы движения с применением металлических сильфонов или резиновых диафрагм, выполненные по схеме 1 табл. 9-4, надежнее устройств, приведенных

в табл. 9-3, и проще в эксплуатации, но могут обеспечить сравнительно небольшие перемещения. Для увеличения длины перемещения в некоторых конструкциях вместо одного металлического сильфона применяют гирлянду сильфонов или телескопические сильфоны, как это показано на рис. 9-16 [41].

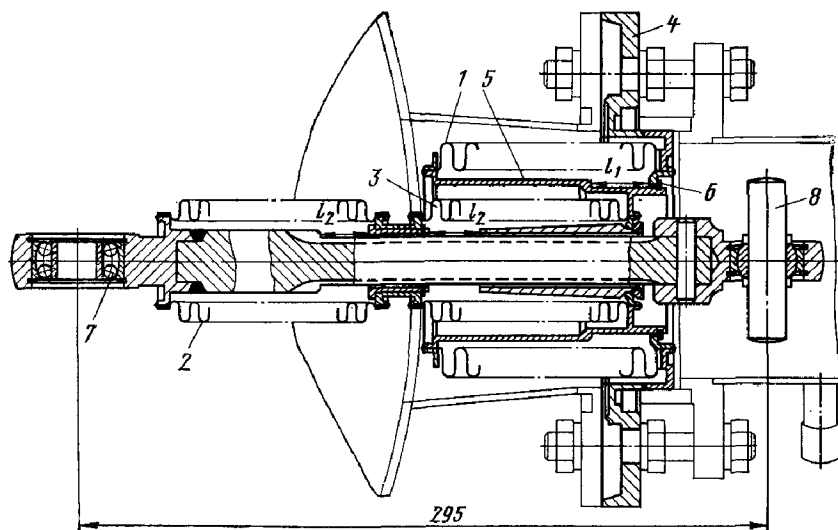


Рис. 9-16. Ввод поступательного движения с телескопическими сильфонами.

Уплотнение ввода осуществляется большим внешним сильфоном 1 и двумя внутренними сильфонами 2 и 3. Сильфон 1 приварен одним концом к фланцу 4, а другим к стакану 5. Стакан 5 фиксируется относительно фланца 4 стопорным кольцом 6. Сваренные между собой сильфоны 2 и 3 приварены в свою очередь одним концом к штоку 7, а другим — к стакану 5. Шток 7 присоединяется к ведущему звену привода с помощью пальца 8, а к ведомому звену в вакуумном объеме — с помощью радиально-сферического подшипника.

Работает ввод следующим образом: при перемещении штока 7 вправо вначале сжимается внешний сильфон 1 и выбирается ход l_1 , а затем сжимаются два внутренних сильфона 2 и 3 и выбирается ход l_2 каждого сильфона. Таким образом, максимальный ход штока составит:

$$L = l_1 + l_2 + l_2. \quad (9-1)$$

Еще большие перемещения (700 мм и более) достигаются при использовании ввода импульсного поступательного движения, принципиальная схема которого показана на рис. 9-17 [18]. Для сообщения импульсного поступательного движения штанге 2 используются два зажима: подающий зажим 3 и фиксирующий зажим 4.

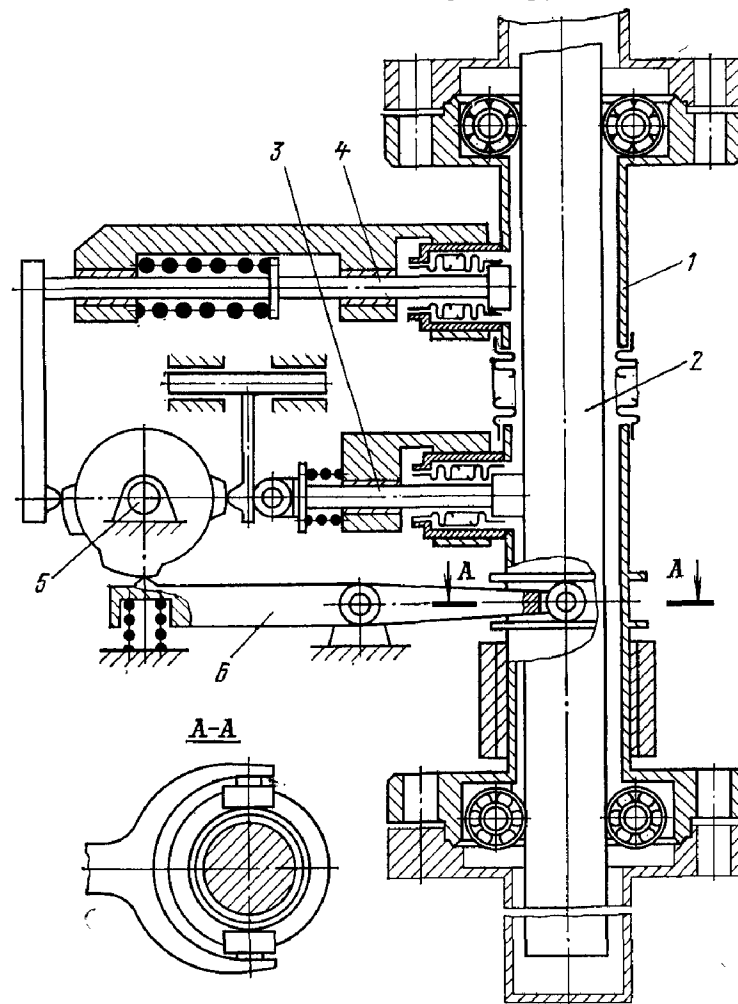


Рис. 9-17. Ввод импульсного поступательного движения.

1 — корпус; 2 — штанга; 3 — подающий зажим; 4 — фиксирующий зажим; 5 — кулачковый механизм; 6 — рычаг.

При вращении кулачкового механизма 5 подающий зажим входит в контакт со штангой 2, а фиксирующий зажим выходит из контакта с ней. При дальнейшем вращении

шении кулачкового механизма рычаг *б* перемещает подвижную часть корпуса на величину установленной подачи. При этом подающий зажим и находящаяся с ним в контакте штанга *2* также перемещаются. Затем зажим фиксирующий входит в контакт со штангой и фиксирует ее, а подающий зажим выходит из контакта, после чего подвижная часть корпуса вместе с подающим зажимом возвращается в исходное положение. При работе кулачкового механизма такой цикл подачи непрерывно повторяется до тех пор, пока штанга *2* не переместится на заданную величину.

Реверсирование осуществляется за счет изменения направления вращения кулачкового механизма.

Высокая надежность работы механизма достигается за счет обеспечения работы пар трения в режиме *статического* трения, который характеризуется минимальным смещением поверхностей элементов пары под нагрузкой. Благодаря этому резко снижаются износ рабочих поверхностей, их тепловыделение и газовыделение.

Угол качательного движения ввода, выполненного по схеме 2 табл. 9-4, из соображений надежности ограничен допустимой величиной деформации уплотнительного элемента — металлического сальфона или резиновой мембраны.

В конструкции ввода по схеме 3 табл. 9-4 (рис. 9-18) промежуточное звено *2* описывает коническую поверхность с вершиной в центре пространственного шарнира. Крутящий момент от сил трения, возникающий в шарнирах между промежуточным звеном *2* и ведущим и ведомым валами *5* и *1*, может восприниматься гибким уплотнительным элементом. Применение пространственного шарнира, воспринимающего крутящий момент, позволяет исключить касательные напряжения (скручивание), вследствие чего уплотнительный элемент будет нагружен лишь напряжениями изгиба, что повысит надежность и долговечность его работы.

Для передачи вращения в вакуумную полость при больших моментах сопротивления применяется ввод, выполненный по схеме 4 табл. 9-4. Характерной особенностью ввода движения по этой схеме является использование планетарного механизма для разгрузки сальфона от скручивающих его оболочку усилий. Во вводе по этой схеме вращение передается с помощью вала *4* с изогнутым концом, который входит в глухую расточку

промежуточного звена *1*. Промежуточное звено с жестко закрепленным коническим сателлитом в свою очередь вставлено по ходовой посадке в наклонную расточку в ведущем поводе *3*. Момент от сил трения, возникающих в опорах промежуточного звена, воспринимается планетарной шестеренчатой передачей, сателлит и солнечная коническая шестерня *2* которой имеют одинаковое число зубьев.

На рис. 9-19 показан ввод вращения, предназначенный для передачи значительных крутящих моментов с разгрузкой сальфона по схеме 4 табл. 9-4. В этой конструкции солнечная шестерня *1* и сателлит *7* имеют одинаковое число зубьев. Вращение шестерни *2*, сидящей на ведомом валу, передается второй, внутренней шестерней-сателлитом *6*, имеющей обычно число зубьев больше на единицу, чем у шестерни *2*. Поэтому ввод движения одновременно является редуктором с передаточным отношением

$$i = \frac{z_1}{z_2 - z_1}, \quad (9-2)$$

где z_1 — число зубьев шестерни *2*; z_2 — число зубьев сателлита *6*.

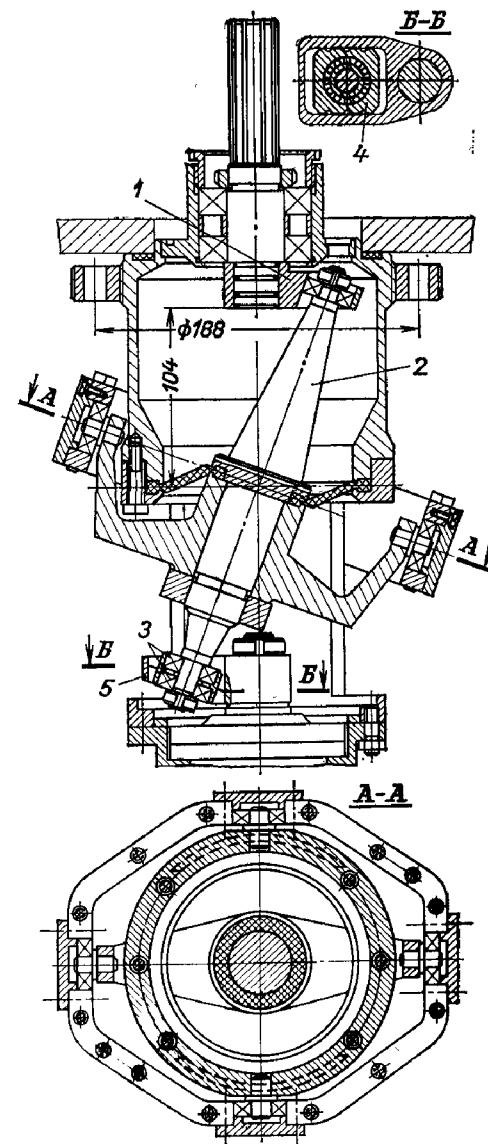


Рис. 9-18. Ввод вращения с пространственным шарниром (см. схему 3 табл. 9-4).

1, 5 — поковки; *2* — промежуточное звено; *3* — шарикоподшипники; *4* — обойма.

Для ограничения деформации сильфона необходимо стремиться к уменьшению угла качания δ (рис. 9-19), и обычно $\delta=2\div 4^\circ$. При этом передаточное отношение механизма более 200, так как

$$\cos \delta = \frac{i}{i+1}. \quad (9-3)$$

Сборку механизма надо осуществлять таким образом, чтобы сопряжение зубчатого зацепления шестерен 1 и 7 не вызывало даже малейшего скручивания обо-

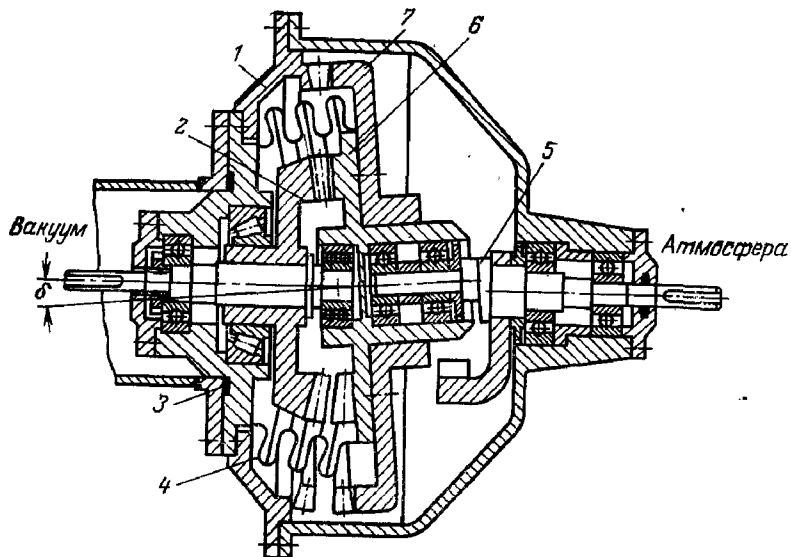


Рис. 9-19. Ввод вращения с разгрузкой гибкого уплотнительного элемента (см. схему 4 табл. 9-4).

1 — солнечная шестерня; 2 — шестерня ведомого вала; 3 — резиновый или металлический уплотнитель; 4 — металлический сильфон; 5 — ведущий вал; 6 — внутренняя шестерня; 7 — наружная шестерня сателлита.

лочки сильфона; в противном случае срок службы сильфона резко понизится.

Значительно проще в изготовлении устройство, выполненное по схеме 5 табл. 9-4. Однако этот ввод движения обеспечивает передачу гораздо меньших крутящих моментов, так как гибкий герметизирующий элемент (мембрана или сильфон) нагружается крутящим моментом от сил трения в опорах промежуточного звена и деформируется (см. рис. 9-27,б); при этом наряду с изгибом, герметизирующий элемент испытывает попе-

речную деформацию. Поэтому радиусы кривошипов на ведущем и ведомом звеньях должны быть небольшими с целью ограничения величины деформации гибкого герметизирующего элемента.

На рис. 9-20 показано устройство для передачи вращения с использованием в качестве подвижного уплотнения металлического сильфона 3. Ведущий вал 4 через промежуточное звено 2, совершающее плоскопараллельное движение, передает вращение ведомому валу 1. Эксцентриситет промежуточного звена относительно оси ведущего и ведомого валов определяет усилия, действующие на подшипники устройства. Эксцентриситет ограничивается допустимыми деформациями металлического сильфона и не может быть большим. В приведенной конструкции эксцентриситет составляет 4,5 мкм.

Значительный интерес представляют вводы движения с использованием волновой передачи, которые позволяют передавать в вакуумный объем большие крутящие моменты.

Ввод движения с волновой зубчатой передачей (схема 6 табл. 9-4) состоит из жесткого колеса 1, тонкостенного зубчатого колеса 2, являющегося одновременно герметизирующим элементом, и генератора деформации 3.

Дуг зубчатых колес 1 и 2 сделан одинаковым, а число зубьев разным. Генератор 3 при своем вращении упру-

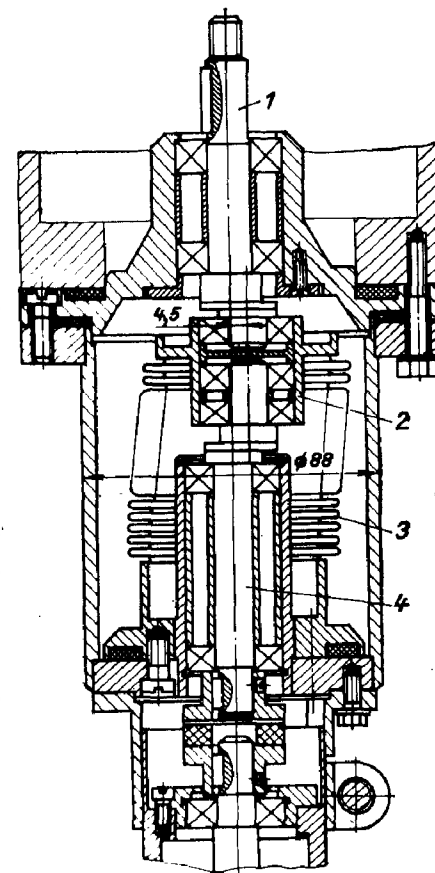


Рис. 9-20. Ввод вращения с промежуточным звеном, совершающим плоскопараллельное движение (см. схему 5 табл. 9-4).

1 — ведомый вал; 2 — промежуточное звено; 3 — металлический сильфон; 4 — ведущий вал.

го деформирует тонкостенное колесо 2 таким образом, что в зоне большей оси эллипса зубья колес находятся в зацеплении, а в зоне малой оси между их вершинами создается гарантированный зазор. В промежуточных положениях зубья между большой и малой осями находятся в неполном зацеплении. Общее количество зубьев, находящихся в контакте и передающих нагрузку, зависит от формы генератора деформации 3 и профиля зубьев.

При вращении генератора 3 волнообразно деформируется тонкостенное колесо 2 и зона зацепления будет перемещаться. Так как тонкостенное колесо 2 неподвижно, то начнет вращаться жесткое колесо 1, при этом передаточное число i ввода будет равно:

$$i = \frac{z_1}{z_1 - z_2}, \quad (9-4)$$

где z_1 — число зубьев на жестком колесе 1 с внутренним зацеплением; z_2 — число зубьев на тонкостенном колесе 2 с внешним зацеплением.

Разность чисел зубьев колес 1 и 2 обычно делают равной числу волн деформации. В данном случае эллиптический генератор 3 создает одновременно две волны деформации по большой оси, и разность чисел зубьев будет равна 2.

Необходимо отметить, что волновая передача может работать как в режиме редуктора с очень большим передаточным отношением, так и в режиме мультипликатора. Благодаря тому, что в зацеплении одновременно участвует большое количество зубьев, передача обладает высокой кинематической жесткостью при практическом отсутствии люфтов между зубчатыми колесами.

На рис. 9-21 показана конструкция ввода, выполненного по схеме 6 табл. 9-4. При габаритных размерах, указанных на рисунке, ввод обеспечивает передачу момента до 0,024 Нм с передаточным числом $i=72$.

Для ввода в вакуумный объем сложных движений нашли применение комбинированные вводы. Одна из конструкций для поступательного и вращательного движений показана на рис. 9-22, в которой используются элементы по схемам 1, 5 табл. 9-4. Вращение вала 1 передается от ведущего маховика 2 с помощью промежуточного звена 3, совершающего плоскопараллельное движение (см. схему 5 табл. 9-4). Поступательное пере-

мещение вала 1 осуществляется при вращении маховика 4 и связанной с ним гайки 5. При этом начинает поступательно перемещаться корпус 6, который образует с гайкой 5 резьбовую пару. Вращение корпуса 6 предотвращается шпонкой 7, закрепленной на неподвижном фланце 8. Герметизация ввода поступательного движения достигается металлическим сильфоном 9 (см. схему 1 табл. 9-4).

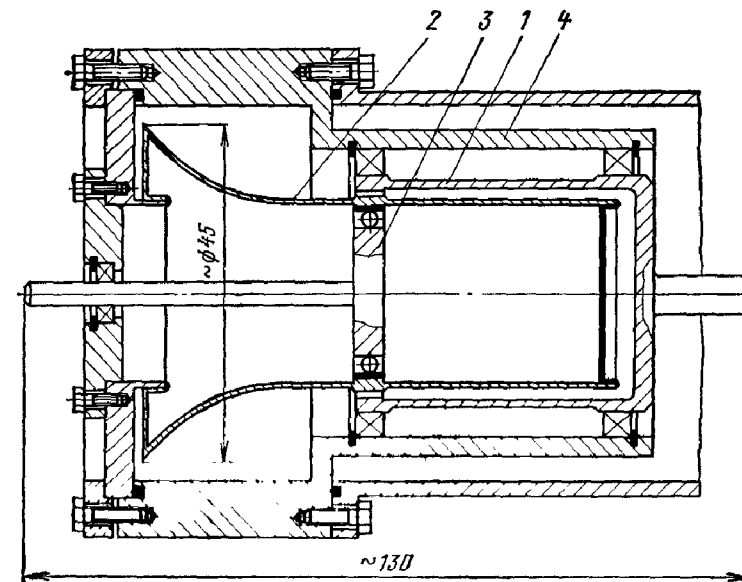


Рис. 9-21. Ввод вращения с использованием волновой зубчатой передачи.

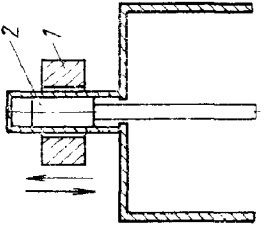
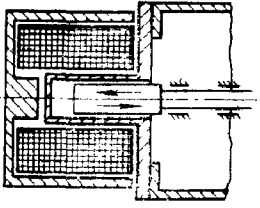
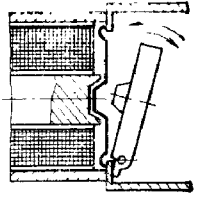
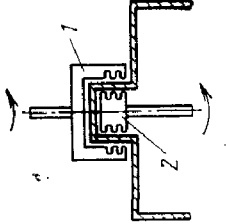
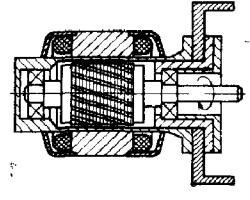
1 — жесткое колесо; 2 — тонкостенное зубчатое колесо; 3 — генератор деформации; 4 — корпус.

В вводах движения с неподвижным уплотнительным элементом усилие на ведомое звено передается с помощью магнитного поля, и движущееся звено не имеет непосредственного контакта со стенкой корпуса.

Некоторые схемы вводов с магнитным приводом приведены в табл. 9-5. Герметичность таких устройств высока, так как в них отсутствуют подвижные вакуумные элементы.

Следует, однако, учитывать, что с увеличением момента сопротивления на ведомом звене вводов с магнитным приводом возрастает сдвиг ведомого звена относительно ведущего (т. е. передача кинематически нежест-

Вводы движения с неподвижным уплотнительным элементом (с магнитным приводом)

Номер схемы	Наименование ввода движения	Схема конструкции	Диапазон рабочих давлений, Па	Максимальная температура прогрева, К	Частота вращения и величина перемещения л. об/мин, в, м/с L, м	Кинематическая жесткость	Максимальный передаваемый момент, Н·м
1	Ввод поступательного движения с постоянным магнитом		До 10^{-9}	750—1000	—	Нежесткая связь	—
2	Ввод поступательного движения с электромагнитом		До 10^{-9}	600—1000	—	То же	—
3	Ввод качательного движения с электромагнитом		До 10^{-9}	600—1000	Угол поворота до 15°	То же	—
4	Ввод вращения с постоянным магнитом		До 10^{-9}	600—800	$n=500 \div 700$	То же	1—1,5
5	Ввод вращения с вращающимся магнитным полем		До 10^{-5}	450	$n=10\,000$	То же	—

кая), а максимальный передаваемый момент обычно невелик. Поэтому такие вводы движения чаще всего используют при больших частотах и малых нагрузках.

В конструкции устройства по схеме 1 табл. 9-5 при перемещении наружного магнита 1 перемещается якорь 2, отделенный от магнита тонким стаканом из немагнитного материала.

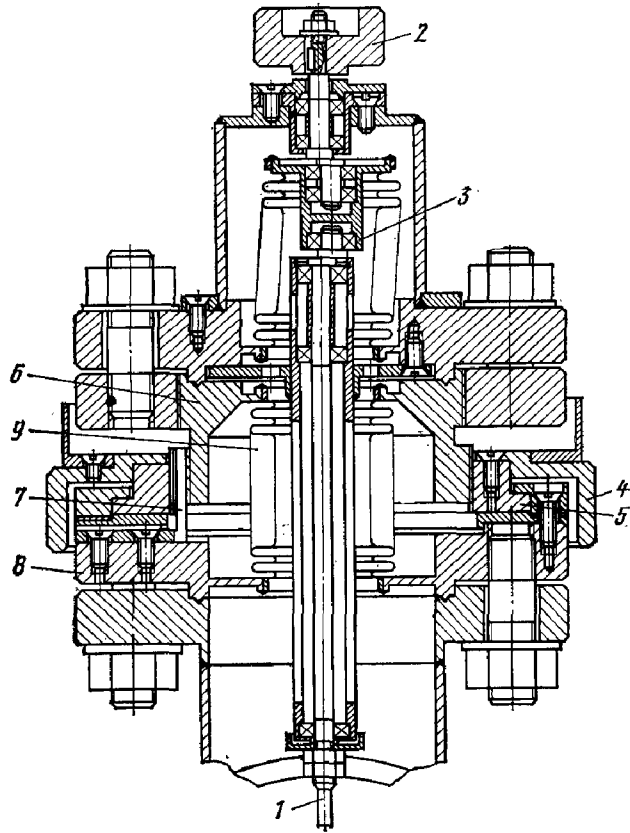


Рис. 9-22. Комбинированный ввод поступательно-го и вращательного движений.

В конструкции устройства по схеме 2 табл. 9-5 в отличие от схемы 1 табл. 9-5 для тех же целей применен электромагнит.

В устройстве по схеме 3 табл. 9-4 также используется электромагнит для создания качательного движения якоря.

На рис. 9-23 приведена конструкция устройства для передачи вращения с применением постоянного магнита, выполненная по схеме 4 табл. 9-5. Вращение от электродвигателя передается валу, на конце которого помещаются башмаки постоянного магнита 3. На ведомом валу укреплен якорь 1. Герметизирующий стакан 2 выполнен из немагнитного материала и имеет толщину стенки в цилиндрической части 0,3—0,5 мм. На полюсах якоря и магнита сделаны канавки, перераспределяющие магнитный поток с целью его концентрации. Магниты изготавливаются из никель-кобальтовых сплавов с направленной кристаллизацией.

В тех случаях, когда в вакуумный объем необходимо ввести вращение с частотой, равной или близкой к частоте вращения асинхронных двигателей, целесообразно применять конструкцию, изображенную на рис. 9-24 (схема 5 табл. 9-5) [56]. В этой конструкции в качестве ведомого звена используется короткозамкнутый ротор 1 обычного асинхронного двигателя. Цилиндрическую часть ротора протачивают на 0,5—0,7 мм на сторону, с тем чтобы разместить между ротором и статором 3 вакуумно-плотную немагнитную перегородку.

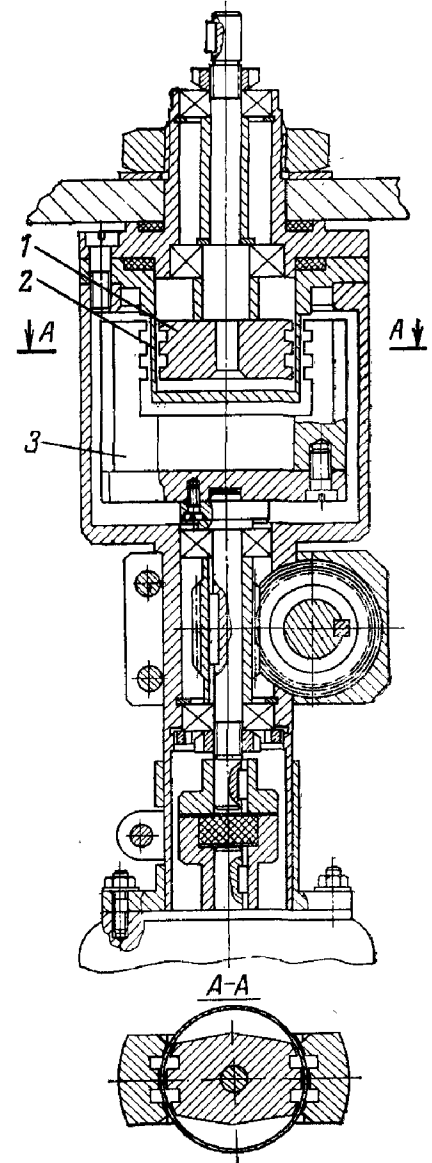


Рис. 9-23. Ввод вращения с использованием постоянного магнита.

ку 2, изготовленную из стали 12Х18Н10Т. Так как в этой конструкции отсутствует вентилятор, охлаждение статора осуществляется водой, протекающей по трубке 4.

Для компенсации теплового расширения ротора 1 предусмотрен зазор, равный 0,5 мм, между задней крышкой и подшипником. С торца двигателя имеется иллюминатор, позволяющий наблюдать за вращением ротора. Следует отметить, что вследствие увеличенного

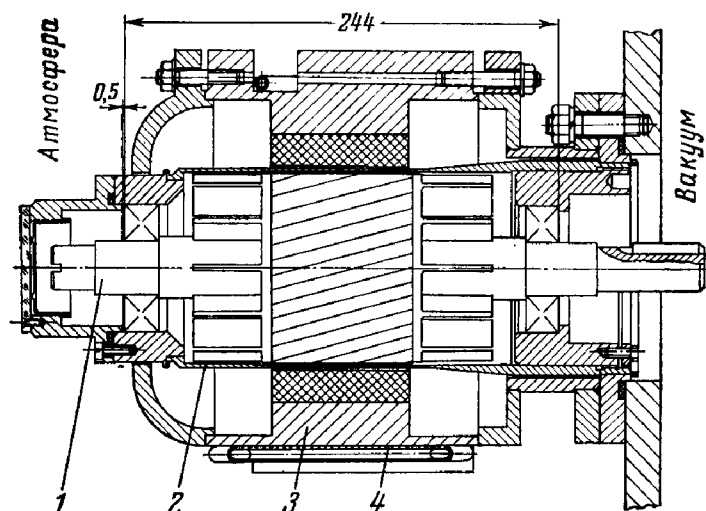


Рис. 9-24. Ввод вращения с использованием асинхронного двигателя.

зазора между ротором и статором мощность двигателя уменьшается, так как при номинальном токе напряжение питания будет меньшим в 2—3 раза.

В тех случаях, когда частота ввода движения отличается от частоты вращения асинхронных двигателей, можно рекомендовать вводы вращения, выполненные по типу индукционных муфт.

9-6. РАСЧЕТ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИХ ГИБКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В вакуумной технике в качестве гибких герметизирующих элементов наибольшее распространение получили резиновые мембраны и металлические сильфоны.

Расчет резиновых мембран. При расчете резиновых мембран определяют наибольший ход, усилие и напря-

жение, возникающее в результате действия перепада давлений с разных сторон мембраны.

Наибольший ход $h_{\text{наиб}}$ (рис. 9-25) обычно принимается:

$$h_{\text{наиб}} = (0,25 \div 0,5) (D - d), \quad (9-5)$$

где $d/D = 0,7 \div 0,8$, причем меньшему соотношению диаметров соответствует больший ход h .

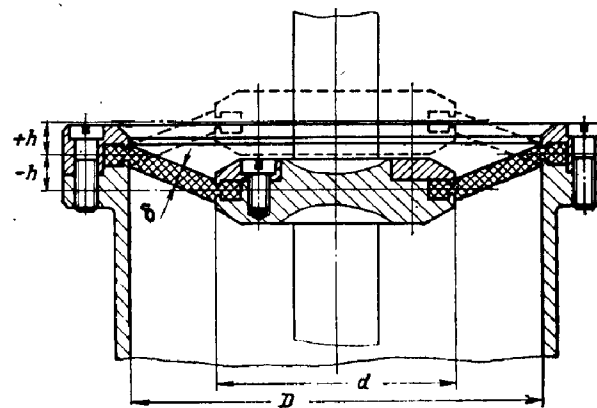


Рис. 9-25. К расчету резиновых мембран.

При расчете мембран, работающих в устройствах по схемам 1, 5 табл. 9-4, пользуются этой же зависимостью.

Осевое усилие $P_{\text{эфф}}$ на мембране определяется уравнением

$$P_{\text{эфф}} = \xi_{\text{мембр}} K_{\text{мембр}} \Delta p A, \quad (9-6)$$

где Δp — разность давлений; A — площадь мембраны; $K_{\text{мембр}}$ — коэффициент неравномерности, зависящий от хода: при $D \leq 160$ мм $K_{\text{мембр}} = 1$ для всех d/D ; при $D > 160$ мм $K_{\text{мембр}} \approx 1 + 2,15h/D$ для $d/D = 0,7 \div 0,8$; $\xi_{\text{мембр}}$ — коэффициент эффективности мембраны при нулевом прогибе:

$$\xi_{\text{мембр}} = \frac{\frac{\pi}{12} (D^2 + Dd + d^2)}{\frac{\pi}{4} D^2}. \quad (9-7)$$

Напряжение τ , возникающее в мембране в результате воздействия разности давлений, определяется по формуле

$$\tau = \frac{\Delta p (D^2 - d^2)}{4D\delta}, \text{ Н/м}^2, \quad (9-8)$$

где Δp — разность давлений, Н/м²; δ — толщина мембраны, м.

Допустимое напряжение на срез $\tau_{\text{доп}}$ для резины принимают $(20-30) \cdot 10^5$ Н/м².

Расчет металлических сифонов. Работоспособность ввода движения с сифонным уплотнением в основном определяется долговечностью сифона. Долговечность зависит от напряжений, возникающих в материале сифона.

Расчетная схема сифона, наиболее близкая к действительности (с учетом скруглений гофров), принята в [77]. Расчет по этой схеме довольно сложен, в связи с чем обычно пользуются расчетной схемой, в которой сифон рассматривается как система кольцевых пластин, попеременно связанных по внешнему и внутреннему контурам.

Рис. 9-26. Металлический сифон.

При этом в результате деформации сифона в осевом направлении на h возникающее в нем напряжение равно:

$$\sigma_h = \frac{h}{R_B} K_{\text{сил1}}, \quad (9-9)$$

где R_B — внутренний радиус сифона (рис. 9-26); $K_{\text{сил1}}$ — постоянный для данного сифона коэффициент, подсчитываемый по формуле

$$K_{\text{сил1}} = \frac{E_y \delta K_2}{n (1 - \mu_{\text{п}}^2) R_B}, \quad (9-10)$$

где E_y — модуль упругости; δ — толщина материала сифона; n — число гофров; $\mu_{\text{п}}$ — коэффициент Пуассона;

K_2 — коэффициент, являющийся функцией отношения

$$K = R_{\text{н}}/R_{\text{в}}. \quad (9-11)$$

При расчете напряжения σ_h по наружному контуру сифона

$$K_{2\text{н}} = \frac{K^2 - 1 - 2 \ln K}{(K^2 - 1)^2 - 4K^2 (\ln K)^2}; \quad (9-12)$$

и для расчета напряжения σ_h у внутреннего контура сифона

$$K_{2\text{в}} = \frac{2K^2 \ln K - (K^2 - 1)}{(K^2 - 1)^2 - 4K^2 (\ln K)^2}. \quad (9-13)$$

Во вводах движения по схемам 2, 3, 5 табл. 9-4 сифоны подвергаются сложным видам деформации. Так, если в конструкциях по схемам 2, 3 табл. 9-4 ось качения сифона находится посередине его длины, можно считать, что упругая линия сифона представляет собой дугу окружности с радиусом ρ (рис. 9-27, а). При этом наибольшее напряжение при изгибной деформации, возникающее на наружном или внутреннем контуре, равно:

$$\sigma_{\varphi} = \varphi K_{\text{сил2}}, \quad (9-14)$$

где φ — угол относительного поворота торцов; $K_{\text{сил2}}$ — постоянный для данного сифона коэффициент, подсчитываемый по формуле

$$K_{\text{сил2}} = \frac{E_y \delta K_3}{n (1 - \mu_{\text{п}}^2) R_B}. \quad (9-15)$$

При расчете напряжения по наружному контуру сифона

$$K_{2\text{н}} = \frac{1}{2} \frac{1/K (K^2 - 1)}{(K^2 + 1) \ln K - K^2 + 1}, \quad (9-16)$$

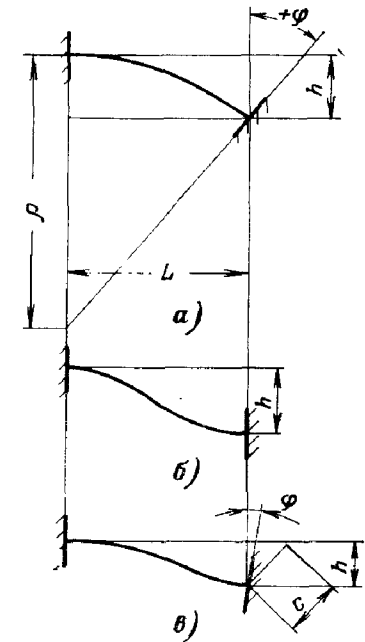


Рис. 9-27. Виды деформации сифонов.

а — изгибная; б — поперечная; в — поперечно-изгибная.

и по внутреннему контуру

$$K_{\text{вн}} = \frac{1}{2} \frac{(K^2 - 1)}{(K^2 + 1) \ln K - K^2 + 1}. \quad (9-17)$$

Во вводах движения по схеме 5 табл. 9-4 (рис. 9-27,б) изгибные напряжения в сильфоне определяются его кривизной.

Сравнивая уравнения упругой линии сильфонов при разных видах деформации (рис. 9-27), можно выделить сечение с минимальным радиусом, в котором имеют место максимальные напряжения. Уравнение упругой линии сильфона составляется так же, как для стержня с постоянной жесткостью.

При изгибной деформации (рис. 9-27,а)

$$\rho = \frac{L}{\varphi} = \text{const}. \quad (9-18)$$

При поперечной деформации (рис. 9-27, б)

$$\rho_{\text{мин}} = \frac{L^2}{6h}. \quad (9-19)$$

Приравняв уравнения (9-18) и (9-19), определим φ и подставим его в уравнение (9-14). Для поперечной деформации получим:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{6h}{L} K_{\text{сил2}}. \quad (9-20)$$

При расположении оси качания сильфона на некотором расстоянии от середины во вводах движения по схемам 2, 3 табл. 9-4 возникает поперечно-изгибная деформация (рис. 9-27,в).

Выражения для расчета максимальных напряжений при поперечно-изгибных деформациях могут быть получены по той же методике, по которой было получено уравнение (9-20).

Напряжение в местах крепления сильфона к неподвижной стенке

$$\sigma'_{\varphi h} = \frac{6h - 2\varphi L}{L} K_{\text{сил2}}. \quad (9-21)$$

Напряжение в местах крепления сильфона к рычагу (схема 2 табл. 9-4) или промежуточному звену (схема 3 табл. 9-4)

$$\sigma''_{\varphi h} = \frac{6h - 4\varphi L}{L} K_{\text{сил2}}. \quad (9-22)$$

Формулы (9-14), (9-20) — (9-22) получены для условия, что длина сильфона по его оси осталась равной длине в его свободном состоянии.

Строго говоря, необходимо также учитывать напряжения $\sigma_{\Delta p}$, возникающие в материале сильфона в результате действия перепада давлений Δp (при перепаде давлений $\Delta p \leq 10^5$ Н/м² этим дополнительным напряжением обычно пренебрегают):

$$\sigma_{\Delta p} = \frac{\Delta p R_{\text{в}}^2}{\delta^2} K_3, \quad (9-23)$$

где $R_{\text{в}}$ — внутренний радиус сильфона; δ — толщина материала сильфона.

При расчете напряжений по наружному контуру сильфона

$$K_{\text{вн}} = \frac{3}{8} \left[2K^2 + (K^2 - 1) \frac{2(1+3K^2) \ln K - (K^2 - 1)(K^2 + 3)}{(K^2 - 1)^2 - 4K^2 (\ln K)^2} \right] \quad (9-24)$$

и при расчете напряжений по внутреннему контуру

$$K_{\text{вн}} = \frac{3}{8} \left[2 + (K^2 - 1) \frac{2K^2 (K^2 + 3) \ln K - (K^2 - 1)(3K^2 + 1)}{(K^2 - 1)^2 - 4K^2 (\ln K)^2} \right], \quad (9-25)$$

где $K = R_{\text{н}}/R_{\text{в}}$.

Суммарное напряжение изгиба будет равно сумме напряжений, возникающих в результате деформации сильфона и действия перепада давлений.

В конструкциях вводов вращения (схемы 3, 5 табл. 9-4) в сильфоне за счет трения в опорах промежуточного звена (см. рис. 9-20) могут возникать касательные напряжения τ .

При расчете напряжений в наружном контуре сильфона

$$\tau_{\text{н}} = \frac{M_{\text{тр}}}{2\pi R_{\text{н}}^2 \delta}, \quad \text{Н/м}^2. \quad (9-26)$$

При расчете напряжений во внутреннем контуре

$$\tau_{\text{в}} = \frac{M_{\text{тр}}}{2\pi R_{\text{в}}^2 \delta}, \quad \text{Н/м}^2, \quad (9-27)$$

где $M_{\text{тр}}$ — суммарный момент трения в опорах промежуточного звена, Н·м.

Тогда эквивалентное напряжение

$$\sigma_{\text{эKB}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}, \text{ Н/м}^2, \quad (9-28)$$

где σ — суммарное напряжение изгиба; τ — касательное напряжение.

Поэтому целесообразно применять вводы вращения, в которых гибкий герметизирующий элемент разгружен от действия касательных напряжений. Так, в конструкции по схеме 3 табл. 9-4 предпочтительно применение пространственного шарнира в качестве опор промежуточного звена вместо сферического.

В поверочных расчетах по формулам (9-9) — (9-28) обычно определяют напряжения в наружном и внутреннем контурах и сравнивают наибольшее полученное напряжение с допустимым, которое для сильфонов из стали 12X18H10T примерно равно $45 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$.

Отметим, что приведенные выше формулы отражают качественную сторону напряженного состояния сильфонов и позволяют производить лишь сравнение различных конструкций вводов движения.

На практике для получения достаточной долговечности сильфонов (10^8 циклов при $p \leq 10^5 \text{ Н/м}^2$ и $T \leq 420 \text{ К}$) рекомендуется использовать не более 50% максимального рабочего хода сильфона (рабочий ход сильфона см. ГОСТ 17210-71, 17211-71). Следует напомнить, что металлические сильфоны могут работать как на сжатие, так и на растяжение, при этом

$$h_{\text{раст}} = 0,8 h_{\text{сж}},$$

где $h_{\text{раст}}$ — рабочий ход сильфона при растяжении; $h_{\text{сж}}$ — рабочий ход сильфона при сжатии.

Расчет осевого усилия $P_{\text{ос}}$, возникающего за счет перепада давлений Δp , производят по формуле

$$P_{\text{ос}} = \pi \left(\frac{R_{\text{н}} + R_{\text{в}}}{2} \right)^2 \Delta p. \quad (9-29)$$

В зависимости от предъявляемых требований к условиям эксплуатации и технологии сборки узлов применяют сильфоны из полутомпака, бериллиевой бронзы БрБ2 (ГОСТ 18175-72), сталей 12X18H10T (ГОСТ 5632-72), 42НХТЮ (ГОСТ 10994-64) и др.

Наилучшими упругими свойствами обладают сильфоны из бериллиевой бронзы, которые могут работать при температурах до 600 К. Сильфоны из стали 12X18H10T

могут подвергаться длительным нагревам до температуры 680 К. Сильфоны из стали 42НХТЮ могут охлаждаться и нагреваться в интервале температур от 210 до 973 К.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА

10-1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ

Коммутационная аппаратура (краны, затворы, клапаны, натекатели) является одним из важнейших элементов вакуумных систем.

Особенности конструкций вакуумной коммутационной аппаратуры вытекают из специфических требований, резко отличающихся от требований, предъявляемых к аппаратуре того же назначения, применяемой в газовых, пневматических и гидравлических системах. К таким специфическим требованиям относятся:

1. *Высокая герметичность.* Особо жесткие требования по герметичности предъявляются к аппаратуре, применяемой в системах высокого и сверхвысокого вакуума.

Высокая герметичность должна быть обеспечена не только по отношению к внешней среде, но и между седлом и запирающим элементом (клапаном) в закрытом положении.

2. *Максимальная проводимость в открытом положении.* Для аппаратуры, работающей при молекулярном режиме течения газа, это требование лучше всего обеспечивается созданием прямоточных конструкций, оказывающих наименьшее сопротивление потоку откачиваемого газа. Так, угловой кран с диаметром условного прохода 80 мм имеет проводимость 191 л/с, а прямоточный затвор с тем же условным проходом — 765 л/с.

3. *Минимальное газовыделение внутренних частей аппаратуры.* Необходимо исключить применение смазок и уплотнителей с высокой упругостью паров. Конструкция аппаратуры должна быть разборной и не должна иметь недоступных для промывки мест и труднооткачиваемых карманов.

4. Незначительная адсорбция газов внутренними поверхностями аппаратуры.

5. Аппаратура должна изготавливаться из некорродирующих металлов.

6. Аппаратура, предназначенная для работы в системах сверхвысокого вакуума, должна допускать с целью ее обезгаживания возможность многократного прогрева до температуры 600—1000 К.

7. Для работы в автоматизированных вакуумных системах коммутационная аппаратура должна иметь дистанционное управление с сигнализацией состояния аппаратуры («открыто — закрыто»).

8. Аппаратура должна иметь гарантированное число циклов не менее 25 000.

Конструктивное выполнение коммутационной аппаратуры, предназначенной для работы в условиях среднего и высокого вакуума, часто отличается лишь стремлением уменьшить поверхность резиновых уплотнений, обращенную в вакуумную полость. Заметим, что с целью унификации в системах среднего вакуума довольно часто применяют аппаратуру, предназначенную для работы в системах высокого вакуума, несмотря на некоторое усложнение конструкции и несколько большую стоимость.

10-2. КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ НЕПРОГРЕВАЕМЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Аппаратура, предназначенная для работы в непрогретаемых вакуумных системах (давление $p > 5 \cdot 10^{-5}$ Па), обычно изготавливается из стали 20 и подвергается антикоррозионному покрытию — химическому никелированию или лужению.

В качестве уплотнительных элементов в непрогретаемой коммутационной аппаратуре чаще всего применяют вакуумную маслостойкую резину марки 9024.

Усилие уплотнения, при котором обеспечивается необходимая герметичность коммутационной аппаратуры, составляет $(10—13) \cdot 10^5$ Н/м² для резиновых уплотнителей прямоугольного сечения и $(6—17) \cdot 10^5$ Н/м² для уплотнителей трапециевидального сечения.

Наиболее распространенные схемы аппаратуры с ручным управлением приведены в табл. 10-1.

В вакуумных системах, предназначенных для лабораторных целей, нашли широкое применение стеклянные пробковые краны различных конструкций (проходные, угловые, многоходовые, порционные), выполненные по схеме 1 табл. 10-1 [85]. В промышленных установках стеклянные краны почти не применяются из-за малой механической прочности и трудности автоматизации таких вакуумных систем.

В неавтоматизированных промышленных установках весьма часто используются краны золотникового типа, выполненные по схеме 2 табл. 10-1. Краны этого типа позволяют совместить в одном корпусе несколько комммутирующих элементов и исключить ошибки оператора, возникающие при неправильной последовательности включения соответствующих комммутирующих устройств.

В кранах с винтовым приводом, выполненных по схемам 3, 4 табл. 10-1, давление тарелки на седло определяется усилием, прикладываемым оператором, что часто приводит к преждевременному выходу из строя уплотнителя. Недостатком существующих кранов является и то, что отсутствуют указатели открытого или закрытого положения.

На рис. 10-1 изображен кран с сильфонным уплотнением штока, выполненный по схеме 3 табл. 10-1 (см. также ГОСТ 14715-77). Для удобства сборки привод крана с подвижным сильфонным уплотнением смонтирован на фланце 3 и представляет собой съемный узел.

На рис. 10-2 изображен кран с ручным эксцентриковым приводом (схема 5 табл. 10-1). Усилие уплотнения клапана создается эксцентриком 1, перемещение по вер-

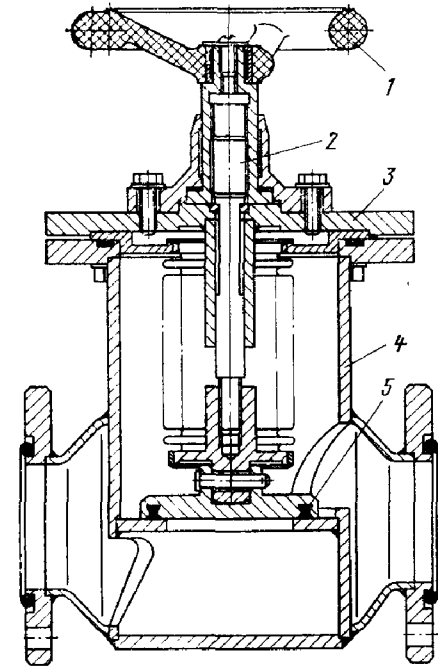


Рис. 10-1. Вакуумный кран с ручным винтовым приводом.

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

Коммутационная аппаратура с ручным управлением для неогреваемых вакуумных систем

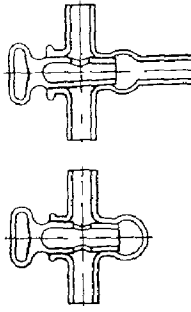
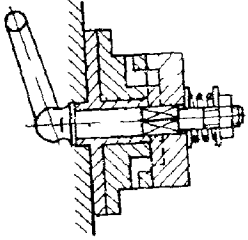
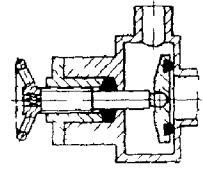
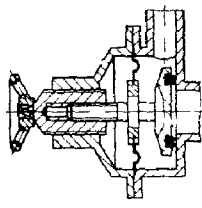
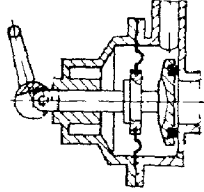
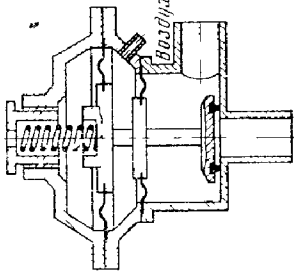
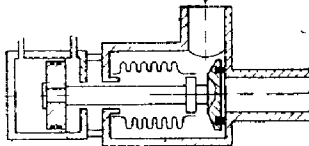
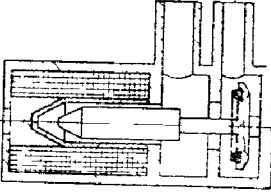
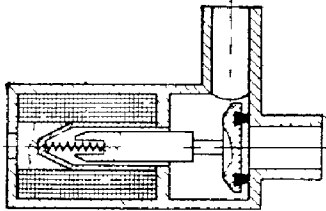
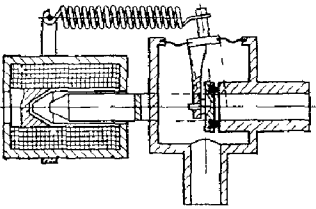
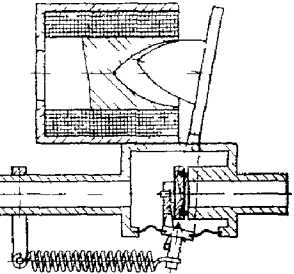
Номер схемы	Наименование	Схема	Диапазон условного прохода $d_{\text{у.к}}$, мм	Область применения	Уплотнение подвижного элемента	Примечание
1	Пробочные краны		6—35	Стеклянные вакуумные системы с давлением $p > 10^{-3}$ Па	Герметичность обеспечивается с помощью вакуумной смазки ГОСТ 9645-61	—
2	Краны золотникового типа		—	Металлические вакуумные системы с давлением $p > 10^{-3}$ Па	Герметичность обеспечивается за счет притирки поверхностей и применения вакуумной смазки	Имеют положение соответствующее различным этапам откачки и наполнения газом
3	Краны с винтовым приводом		10—100	а) Металлические вакуумные системы с давлением $p > 1 \cdot 10^{-4}$ Па б) Металлические вакуумные системы с давлением $p > 1 \cdot 10^{-5}$ Па	а) Сальниковое уплотнение штока, выполненное по схемам 2, 3 табл. 9-3 б) Сильфонное уплотнение штока, выполненное по схеме 1 табл. 9-4	Вместо резьбы часто применяют баночное соединение штока с корпусом Краны ВРП изготавливаются по ТУ 26-04-360 71. Основные параметры и размеры см. ГОСТ 14715-77
4	Краны с дифференциальной резьбой		50—200	а) Металлические вакуумные системы с давлением $p > 10^{-1}$ Па б) Металлические вакуумные системы с давлением $p > 5 \cdot 10^{-5}$ Па	а) Уплотнение штока резиновой мембраной б) Уплотнение штока металлическим сильфоном по схеме 1 табл. 9-4	—
5	Краны с эксцентриковым приводом		10—100	а) Металлические вакуумные системы с давлением $p > 1 \cdot 10^{-1}$ Па б) Металлические вакуумные системы с давлением $p > 5 \cdot 10^{-5}$ Па	а) Уплотнение штока резиновой мембраной б) Уплотнение штока металлическим сильфоном по схеме 1 табл. 9-4	Давление тарелки крана на седло определяется усилием пружины («силовое замыкание») или при «кинематическом замыкании» — ходом штока, т. е. эксцентриситетом. Краны ВРП изготавливаются по ТУ 26-04-360-71. Основные параметры и размеры см. ГОСТ 14715-77

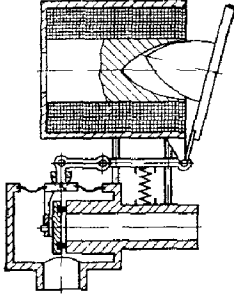
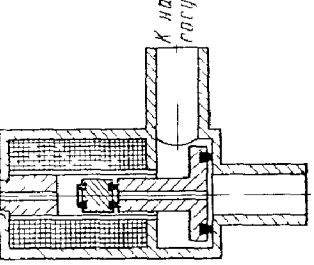
Таблица 10-2
Коммутационная аппаратура с дистанционным управлением для непрогреваемых вакуумных систем

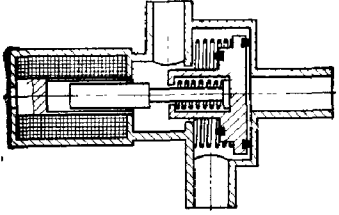
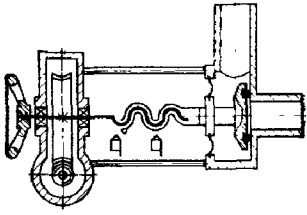
Номер схем	Наименование	Схема	Диаметр условного прохода ДУ, мм	Область применения	Уплотнение подвиж- ного элемента	Примечание
1	Клапан с пневма- тическим и гидравлическим приводами		15—80	Вакуумные системы с давлением $p > 10^{-1}$ Па	Уплотнение штока выполнено с помощью резиновой диафрагмы	—
2	Клапан с пневма- тическим или гидравлическим приводом		> 50	Вакуумные системы с давлением $p > 1 \cdot 10^{-3}$ Па	Уплотнение штока выполнено по схеме 1 табл. 9-4	Обычно комплектуется с электромагнитным реперным датчиком

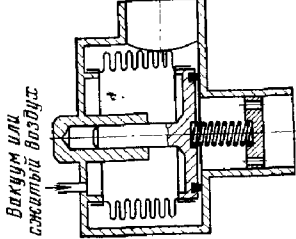
Продолжение табл. 10-2

Номер схем	Наименование	Схема	Диаметр условного прохода ДУ, мм	Область применения	Уплотнение подвиж- ного элемента	Примечание
3	Клапан с электро- магнитным приво- дом (усилие уп- равления обес- печивается магни- том)		10—80	Вакуумные системы с давлением $p > 1 \cdot 10^{-3}$ Па	Уплотнение штока выполнено по схеме 2 табл. 9-5	Открытие клапана происходит под действием массы якоря. Работают только в одном положении
4	а) Клапан с электромагнитным приводом (усилие уплотнения создается пружиной)		10—80	То же	То же	Может служить предохранительным клапаном. Работает в любом положении. Клапаны КМУ изготавливаются по ТУ 26 06-254-68. Особые параметры и размеры см. ГОСТ 14717-69

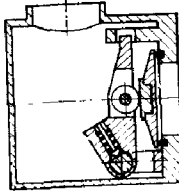
Номер схемы	Наименование	Схема	Диаметр условного прохода ДУ, мм	Область применения	Уплотнение подвиж- ного элемента	Примечание
4	б) Клапан с электромеханическим приводом (усилие уплотнения создается пружиной)		10—80	Вакуумные системы с давлением $p > 10^{-1}$ Па	Уплотнение рычага выполнено с помощью резиновой диафрагмы	Может служить предохранительным клапаном. Работает в любом положении
	в) То же		10—80	То же	То же	Может служить предохранительным клапаном. Обладает повышенной надежностью из-за отсутствия парения скользящих элементов. Работает в любом положении

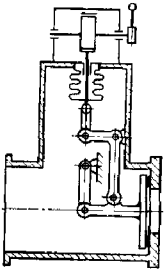
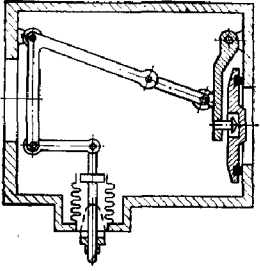
Номер схемы	Наименование	Схема	Диаметр условного прохода ДУ, мм	Область применения	Уплотнение подвиж- ного элемента	Примечание
5	Клапан с электромагнитным приводом и рычажным усилителем		> 50	Вакуумные системы с давлением $p > 10^{-1}$ Па	Уплотнение рычага выполнено с помощью резиновой диафрагмы	Может служить предохранительным клапаном. Работает в любом положении
6	Электромагнитный клапан натекающей		—	Применяется в системах ЦФС в линиях удаления основной массы воздуха из рабочих объемов и предотвращает образование тумана и выпадения росы [47]	То же	Работает в одном положении

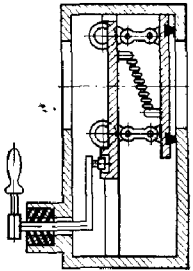
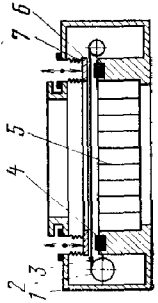
Номер схемы	Наименование	Схема	Диаметр условного прохода ДУ, мм	Область применения	Уплотнение подвиж- ного элемента	Примечание
7	Клапан-перекрыва- тель с электро- магнитным приво- дом		—	Применяется в ваку- умных системах с давлением $p > 10^{-1}$ Па и в системах ЦФС для откачки рабочих объемов	Уплотнение выполнено по схеме 1 табл. 9-4	Работает в одном по- ложении
8	Кран с электроме- хантическим приво- дом		25—100	а) Вакуумные системы с давлением $p > 10^{-3}$ Па б) Вакуумные системы с давлением $p > 10^{-1}$ Па в) Вакуумные системы с давлением $p < 10^{-3}$ Па	а) Уплотнение штока по схеме 3 табл. 9-3 б) Уплотнение штока резиновой диафрагмой в) Уплотнение штока металлическим сальфо- ном по схеме 1 табл. 9-4	— — Изготавливаются по ТУ 26-04-376-72. Основные параметры и размеры см. ГОСТ 14716-77

Номер схемы	Наименование	Схема	Диаметр условного прохода ДУ, мм	Область применения	Уплотнение подвиж- ного элемента	Примечание
9	Клапан с пневмо- вакуумным приво- дом	 <i>Вакуум или сжатый воздух</i>	—	Вакуумные системы с давлением $p < 10^{-3}$ Па	Уплотнение штока ме- таллическим сальфо- ном по схеме 1 табл. 9-4	Усилие уплотнения обеспечивается давле- нием сжатого воздуха. Открытие клапана про- исходит за счет пружины после отдачи воздуха из полости сальфона

Затворы для непрогриваемых вакуумных систем

Номер схемы	Наименование	Схема	Диаметр условного прохода ДУ, мм	Область применения	Уплотнение подвиж- ного элемента	Примечание
1	Затвор с эксцент- риковым механиз- мом уплотнения		80—900	В вакуумных системах с давлением $p = 10^{-3} \div$ 10^{-5} Па	Уплотнение выполне- но по схеме 2 табл. 9-3	Имеет ручной или элект- ромеханический при- вод. Основные пара- метры и размеры за- творов СПУ и СПУТ см. ГОСТ 14718-69

Номер схем	Наименование	Схема	Диаметры условного прохода ДУ, мм	Область применения	Уплотнение подвиж- ного элемента	Примечание
2	Затвор с рычажно-эксцентриковым механизмом уплотнения		32—400	В вакуумных системах с давлением $P > 1 \cdot 10^{-6}$ Па	Уплотнение ввода двигателя выполнено по схеме 3 табл. 9-3 или по схеме 1 табл. 9-4	Имеет ручной или электромеханический привод
3	Затвор с коленно-рычажным механизмом уплотнения		> 80	То же	Уплотнение ввода двигателя выполнено по схеме 2 табл. 9-4	Имеет ручной или электромеханический привод. Обеспечивает не менее 10 ⁴ циклов «открыто — закрыто».

Номер схем	Наименование	Схема	Диаметры условного прохода ДУ, мм	Область применения	Уплотнение подвиж- ного элемента	Примечание
4	Затвор с подвеской тарелки на шарнирном параллелограмме		80—1200	В вакуумных системах с давлением $P > 10^{-4}$ Па	Уплотнение ввода двигателя выполнено по схемам 2, 3 табл. 9-3	Имеет ручной или электромеханический привод. Изготавливаются затворы СПЛП по ТУ26-06-255-68. Основные параметры и размеры см. ГОСТ 14718-69
5	Затвор с гибкой стальной лентой		> 500	То же	Уплотнение вала привода барабана выполнено по схеме 2 табл. 9-3	—

тикали которого ограничивается направляющей 2 («кинематическое замыкание»). «Кинематическое замыкание» позволяет исключить пружину и обеспечивает герметичность при наличии давления с любой стороны тарелки клапана. Положение рукоятки указывает на состояние клапана («открыт — закрыт»).

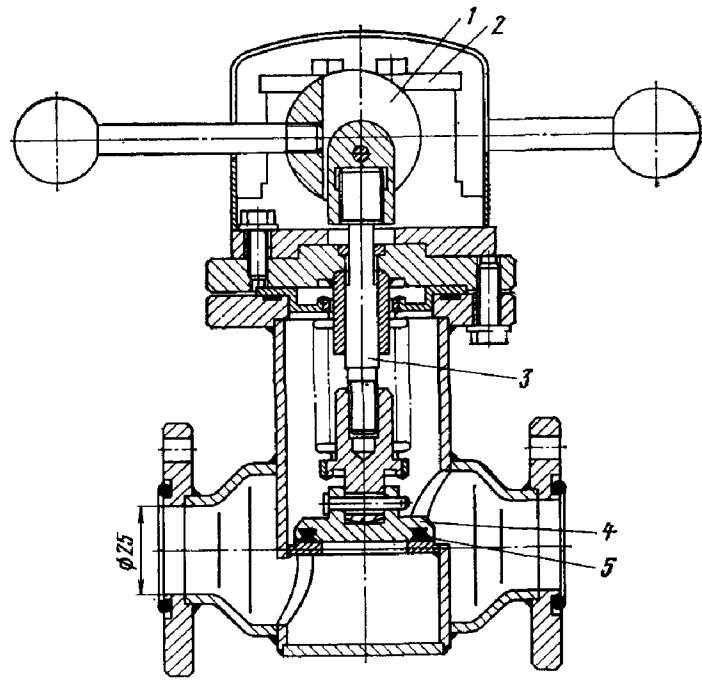


Рис. 10-2. Кран с ручным эксцентриковым приводом.
1 — эксцентрик; 2 — направляющая; 3 — шток; 4 — тарелка крана; 5 — резиновый уплотнитель.

В автоматизированных откачных системах применяется коммутационная аппаратура с дистанционным управлением. Дистанционное управление позволяет производить более рациональную компоновку вакуумных систем и обеспечивает возможность достаточно простого осуществления блокировок и программирования.

В табл. 10-2 приведены наиболее распространенные схемы коммутационной аппаратуры с дистанционным управлением для непрогрываемых вакуумных систем.

В конструкции клапана с пневматическим приводом, выполненным по схеме 1 табл. 10-2, уплотнение резинового клапана осуществляется пружиной, а открытие — воздухом сетевого давления.

Электромагнитные клапаны по конструкции сложнее клапанов с пневматическим приводом, но имеют перед ними ряд преимуществ. Клапаны с электромагнитным приводом, обладая малым временем срабатывания (около 0,1 с), незаменимы в качестве блокировочных элементов, имеют простые цепи управления и получили широ-

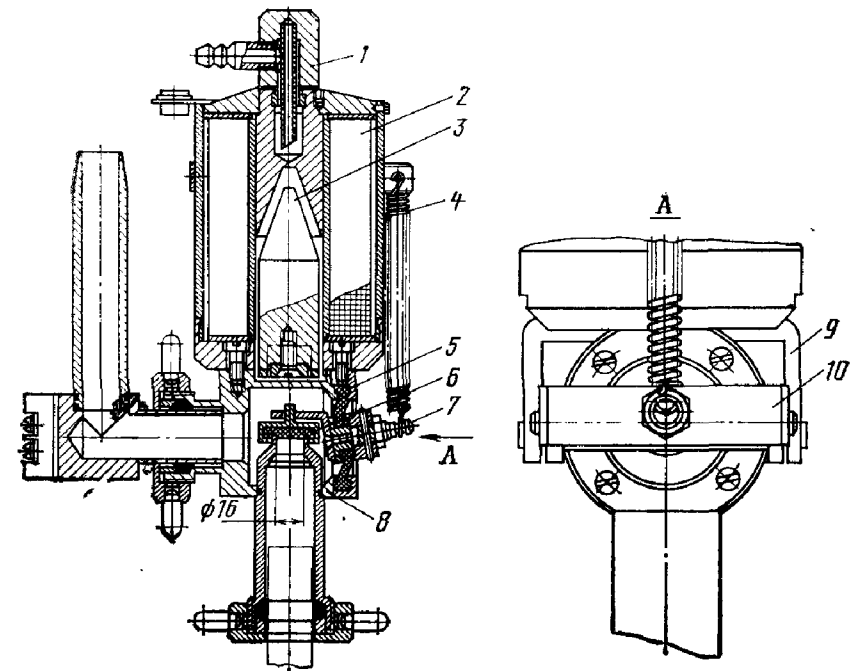


Рис. 10-3. Угловой клапан с электромагнитным приводом.
1 — штуцер водяного охлаждения; 2 — катушка электромагнита; 3 — ярмо; 4 — пружина; 5 — резиновая диафрагма; 6 — резиновый уплотнитель (клапан); 7 — рычаг; 8 — корпус; 9, 10 — скобы.

кое применение в автоматизированных откачных установках. На рис. 10-3 показан угловой клапан с электромагнитным приводом, выполненный по схеме 4,6 табл. 10-2.

Усилие, уплотняющее клапан 6 по седлу, впаивному в корпус 8, создается пружиной 4, которая воздействует на рычаг 7. Рычаг 7 с клапаном введен внутрь корпуса через резиновую диафрагму 5 и жестко закреплен в скобе 10, которая вращается на шариковых подшипниках, чем достигается разгрузка диафрагмы от усилия уплотнения клапана и воздействия атмосферного давления. Открытие клапана производится электромагнитом 2, ко-

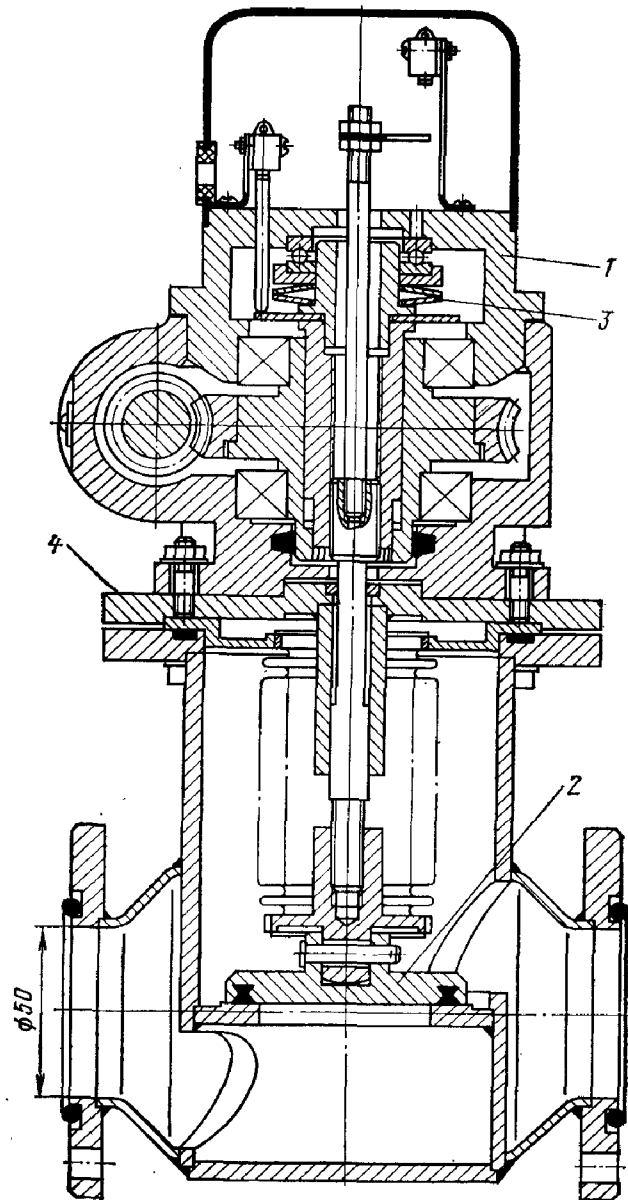


Рис. 10-4. Вакуумный кран с электромеханическим приводом.

торый при подаче на него напряжения 24—28 В втягивает якорь 3. С якорем через скобы 9 и 10 связан рычаг 7 с клапаном 6. Повышенная надежность клапана обеспечена тем, что в отличие от конструкций, выполненных по схеме 3, 4, а, табл. 10-2, все подвижные элементы (якорь, скобы и т. д.) выведены из его вакуумной полости, а в качестве опор применены шариковые подшипники.

На рис. 10-4 приведен чертеж крана с электромеханическим приводом, выполненного по схеме 8 табл. 10-2 (см. также ГОСТ 14716-77).

Привод крана осуществляется от электродвигателя (на рисунке не показан) через червячный редуктор 1 и винтовую пару. С тем чтобы обеспечить сохранение необходимого усилия уплотнения на тарелке 2 при некоторой неточности в конечном положении системы после остановки электродвигателя предусмотрены тарельчатые пружины 3, поставленные с некоторым предварительным натягом. Так же как в конструкции на рис. 10-1, в этом кране для удобства сборки привод с подвижным сифонным уплотнением собран на отдельном фланце 4.

Для перекрытия трубопроводов больших сечений применяют затворы, оказывающие минимальное сопротивление потоку откачиваемых газов (табл. 10-3).

Широкое распространение в отечественной промышленности получили высоковакуумные затворы, один из которых представлен на рис. 10-5 (схема 1 табл. 10-3) (см. ТУ 26-04-577-77).

В открытом положении тарелка 3 расположена вертикально в корпусе 2. При вращении эксцентрикового валика 7 по часовой стрелке тарелка поворачивается на 90° и занимает горизонтальное положение. В это время еще сохраняется небольшой зазор между тарелкой и резиновым уплотнителем 4. При дальнейшем вращении эксцентрикового валика выдавливается фиксатор 8, а рычаг 5 вдвигается в рамку 9. Затем эксцентриковый валик начинает опускать вниз левое плечо рычага 5 и через шарикоподшипник 10 прижимает тарелку к резиновому уплотнителю.

При применении электропривода вращение валика 7 ограничивается концевыми выключателями, а при ручном закрытии — упорами. Открытие затвора осуществляется при вращении эксцентрикового валика против часовой стрелки.

Вал, передающий вращение к эксцентриковому валику, вращается в патрубке, приваренном к корпусу. Уплотнение валика в патрубке осуществляется по схеме 2 табл. 9-3. Ведущий вал связан с эксцентриковым валиком через крестоподвижную муфту.

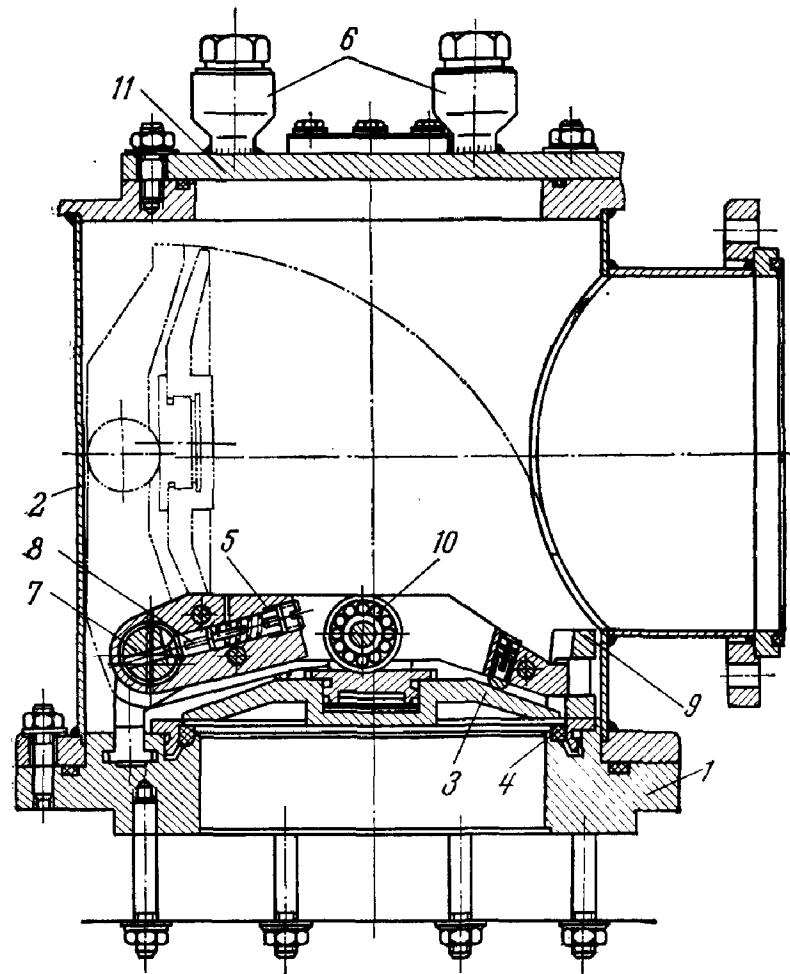


Рис. 10-5. Вакуумный затвор.

1 — фланец; 2 — корпус; 3 — тарелка клапана; 4 — резиновый уплотнитель; 5 — рычаг; 6 — штуцера; 7 — эксцентриковый валик; 8 — фиксатор; 9 — рамка; 10 — шарикоподшипник; 11 — заглушка.

При применении электропривода вращение от электродвигателя передается ведущему валу через двухступенчатый редуктор с прямозубой и червячной передачами.

Для предохранения механизма от перегрузок предусмотрена фрикционная многодисковая муфта.

В зависимости от компоновки вакуумной системы затвор может быть как угловым, так и прямоочным.

Затвор имеет небольшие габариты в плане при сравнительно большой высоте. К недостаткам затвора следует отнести наличие сальникового уплотнения и значительное время закрытия. Так, для затвора с условным проходом 85 мм время закрытия составляет 4 с, а для затвора с ДУ-900 — 12 с.

В затворе, выполненном по схеме 2 табл. 10-3, в открытом положении плоскость тарелки расположена вертикально и оказывает небольшое сопротивление потоку откачиваемого газа.

Затворы, выполненные по схеме 3 табл. 10-3, имеют примерно те же габариты, что и затворы по схеме 1 табл. 10-3 с одинаковым ДУ. Существенным преимуществом затвора с коленно-рычажным приводом являются большая надежность и герметичность ввода движения.

Очень удобны для перекрытия трубопроводов больших сечений затворы, обладающие малыми осевыми размерами и оказывающие незначительное сопротивление потоку откачиваемого газа [20, 52] (см. ТУ26-04-577-77). Конструкция затвора ДУ-160, выполненная по схеме 4 табл. 10-3, приведена на рис. 10-6.

Тарелка 5 с резиновым уплотнителем 7 перекрывает отверстие затвора, уплотняясь по седлу, сделанному за одно целое с крышкой 10. Тарелка подвешена на четырех серьгах 6 и пружинах 11 к каретке 4, перемещающейся на шарикоподшипниках 12 в пазах корпуса 9 с крышками 8 и 10. Движение каретке сообщается кривошипом 3, который также имеет опоры качения. Уплотнение вала кривошипа 3 осуществляется двумя резиновыми кольцами, пространство между которыми заполняется вакуумным маслом (см. схему 2 табл. 9-3). В крайних положениях затвора кривошип стопорится фиксатором 2, вмонтированным в рукоятку 1. При повороте рукоятки по часовой стрелке каретка перемещается вправо до тех пор, пока тарелка не упрется в крышку. При дальнейшем движении каретки вправо серьги выпрямляются, а тарелка опускается вниз и уплотняет отверстие затвора.

Затвор не разуплотняется под действием атмосферного давления с любой стороны тарелки. Затворы, снаб-

женные электроприводом, могут управляться дистанционно.

Однако существенным недостатком конструкции описанного выше затвора является наличие в вакуумной полости элементов привода, таких, как подшипники, направляющие, рычаги и т. д., а сальниковое уплотнение требует тщательного ухода и частых ревизий.

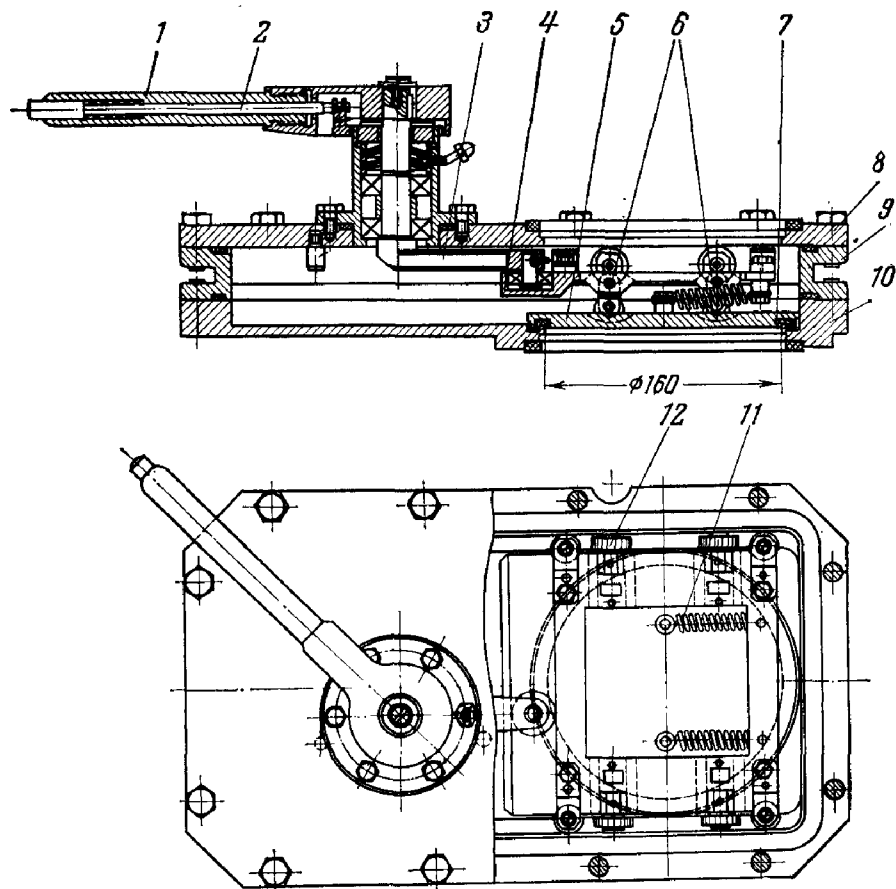


Рис. 10-6. Вакуумный затвор с ручным приводом.

Для перекрытия очень больших каналов с диаметром условного прохода больше 500 мм разработаны затворы, выполненные по схеме 5 табл. 10-3 [76].

В корпусе 1 затвора установлены два барабана, на которых намотана гибкая стальная лента 3. В кольцевой канавке корпуса размещен резиновый уплотнитель 4,

к которому поджимается лента 3 нажимным кольцом 6 с помощью сильфонных прижимов 7, установленных по периметру уплотнителя 4. С тем, чтобы исключить чрезмерную деформацию стальной ленты, в проходном сечении затвора закреплена опорная решетка 5. При открытии затвора лента 4 наматывается на барабан 2 до тех пор, пока имеющееся на ленте отверстие не совместится с проходным сечением затвора.

10-3. КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ПРОГРЕВАЕМЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Коммутационная аппаратура, предназначенная для работы в сверхвысоковакуумных системах (давления ниже $5 \cdot 10^{-5}$ Па), обычно обезгаживается прогревом до температуры 500—900 К. При обезгаживании аппаратуры не должны происходить заклинивание деталей клапанов и нарушение герметичности в соединениях из-за деформации деталей. Уплотняющие элементы аппаратуры должны выдерживать многократные нагревы и охлаждения, а также обеспечивать большое число закрытий.

Большинство цельнометаллических прогреваемых кранов обычно допускает прогрев только в открытом положении.

Все резьбовые элементы (гайки, винты, шпильки) в целях исключения прихватывания во время прогрева покрываются дисульфидом молибдена или сульфидируются. Корпуса аппаратуры, предназначенной для работы в области сверхвысокого вакуума, как правило, изготавливаются из нержавеющей стали 12Х18Н10Т по ГОСТ 5632-72.

Уплотнение клапанов может осуществляться как за счет расплавления и затвердевания металла или сплава с низкой температурой плавления и низкой упругостью пара при температуре плавления (жидкометаллические уплотнения), так и за счет деформации металлического или синтетического уплотнителя с малым газовыделением (например, резины ИРП-2043).

Жидкометаллические уплотнения применяются ограничено из-за большого времени срабатывания, эксплуатационных неудобств, связанных со взаимодействием жидких металлов и сплавов со стенками аппаратуры и

Схемы уплотнений кранов с использованием пластической деформации

Номер схемы	Схема уплотнения		Диаметр условного прохода крана ДУ, мм	Материал уплот- нителя	Удельное давление уплотнения, отнесенное к 1 мм диаметра условного прохода, Н/мм	Примечание
	Уплотненное поло- жение	Открытое положение				
1			10—500	Индий	1—8	—
2			10—250	Медь Алюминий	200—400 100—150	См. рис. 10-7

Продолжение табл. 10-4

Номер схемы	Схема уплотнения		Диаметр условного прохода крана ДУ, мм	Материал уплот- нителя	Удельное давление уплотнения, отнесенное к 1 мм диаметра условного прохода, Н/мм	Примечание
	Уплотненное поло- жение	Открытое положение				
3			10—150	Медь	47—53	См. рис. 10-8
4			10—500	Медь	150	См. рис. 10-10
5			10—100	Медь	150—200	—

атмосферой, а также из-за неизбежного попадания частиц расплавленного металла в вакуумную систему.

Промежуточное положение между расплавляемыми и деформируемыми уплотнениями занимают уплотнения с использованием индия и его сплавов.

Основные схемы уплотнения кранов с использованием пластических деформаций приведены в табл. 10-4.

Удельное давление, необходимое для уплотнения крана, выполненного по схеме 1 табл. 10-4, невелико. Приложение чрезмерного усилия может привести к выдавливанию индия из канавки. Поэтому в конструкциях кранов с индиевым уплотнением необходимо предусматривать ограничители усилия закрытия. При обезгаживании прогревом до температуры, превышающей температуру плавления индия, кран необходимо монтировать таким образом, чтобы не происходило вытекания индия, либо прогревать его в закрытом состоянии.

Наибольшее распространение в промышленности получили цельнометаллические прогреваемые краны, в которых уплотнение происходит за счет пластической деформации материала тарелки клапана или седла.

В уплотнении, выполненном по схеме 2 табл. 10-4, герметизация осуществляется за счет смятия конуса клапана кромками отверстия корпуса крана. Конус клапана изготавливается из мягкого материала, чаще всего из отожженной меди или алюминия.

Шероховатость уплотняющих кромок седла должна быть не более 0,5, а конической поверхности клапана — не более 1. На конической поверхности не допускаются риски, забоины и другие механические дефекты.

С целью уменьшения уплотняющего усилия иногда применяются краны, в которых уплотнение происходит при врезании острых кромок седла корпуса в конус клапана, изготовленного из более мягкого материала (как показано на схеме 3 табл. 10-4). При этом срезаемая стружка при закрытии крана составляет 0,1—0,15 мм. За одно закрытие режущая кромка седла врезается в медный конус всего на несколько микрон, что позволяет производить многократные закрытия крана без смены конуса.

Срок службы кранов с медным клапаном невелик, например для кранов с уплотнением клапана по схеме 2 табл. 10-4 составляет всего 500—1000 циклов (открытий — закрытий). Такой малый срок службы обусловлен

тем, что в конструкциях цельнометаллических кранов с ручным и электромеханическим приводом трудно обеспечить постоянство усилия на штоке клапана, и поэтому приходится с каждым новым циклом вновь деформировать уплотняющий элемент, что требует приложения постоянно возрастающего усилия.

Отметим, что в случае использования в кране с уплотнением по схеме 2 табл. 10-4 пневматического привода, обеспечивающего постоянство усилия на штоке клапана, срок службы крана увеличивается.

В кранах с уплотнением по схеме 4 табл. 10-4 достигается практически постоянная ширина кольца смятия грибка независимо от точности изготовления и сборки, что обеспечивает двукратное уменьшение усилия уплотнения и увеличение более чем на порядок срока службы по сравнению со схемой 2 табл. 10-4.

В уплотнении, выполненном по схеме 5 табл. 10-4, герметизирующим элементом является медное кольцо, изготовленное из проволоки. Конструкция уплотнения достаточно проста и надежна. Число рабочих циклов достигает 3000 без замены уплотняющего элемента.

Схемы коммутационной аппаратуры для прогреваемых сверхвысоковакуумных систем приведены в табл. 10-5.

Кран, выполненный по схеме 1 табл. 10-5, представлен на рис. 10-7. Сменный медный клапан 4 крепится к штоку 3, перемещающемуся во втулке по посадке второго класса точности. Высокие требования предъявляются к правильности геометрической формы конической

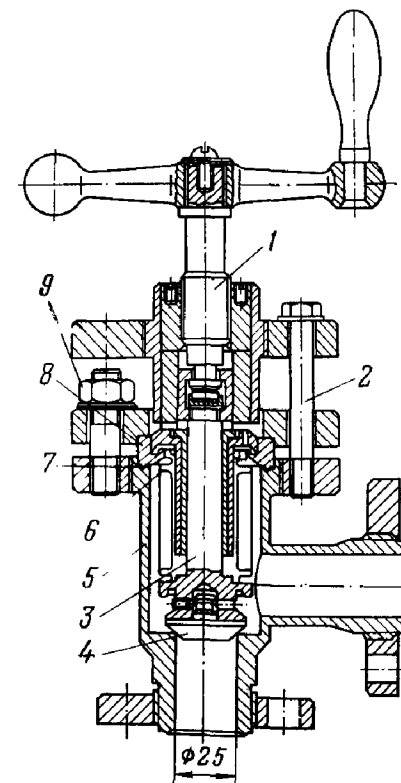
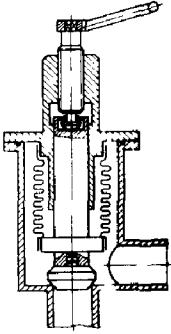
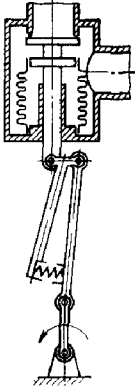
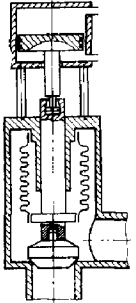


Рис. 10-7. Цельнометаллический прогреваемый кран с ручным приводом.

Коммутационная аппаратура для прогреваемых сверхвысоковакуумных систем

Номер схемы	Наименование	Схема	Диаметр условного прохода ДУ, мм	Примечание
1	Кран с винтовым механизмом перемещения штока		10—200	Имеет ручной или электромеханический привод (см. рис. 10-7 и 10-8)
2	Кран с кривошипно-шатунным механизмом перемещения штока		25—160	То же (см. рис. 10-9 и 10-10)
3	Кран с поршневым приводом штока		25—500	Используется пневматический или гидравлический привод

поверхности клапана и кромок седла. Узел 8 с сальфоном 6 уплотняется с корпусом 5 медной прокладкой 7. Медная прокладка затягивается гайками 9. Усилие уплотнения создается винтом 1 и передается на корпус крана через дополнительный фланец и болты 2, что исключает возможность разуплотнения сальфонного узла 8 с корпусом при закрытии крана.

На рис. 10-8 изображен кран с электромеханическим приводом, в котором применена схема уплотнения 3 табл. 10-4.

Усилие, развиваемое электродвигателем 2, передается через червячный редуктор 1, винтовую пару и предварительно сжатые тарельчатые пружины 8 на шток 6. Тарельчатые пружины, так же как в конструкции на рис. 10-4, обеспечивают сохранение уплотняющего усилия в заданных пределах, несмотря на некоторые неточности при остановке электродвигателя и изменение положения тарелки 7 при закрытии крана вследствие постепенного срезания стружки с конической поверхности тарелки.

Открытое и закрытое положения крана ограничиваются концевыми выключателями 9. После каждой переборки крана необходимо проточить конус тарелки клапана.

В этой конструкции крана требуется обеспечить полное отсутствие забоин и рисок на уплотняющих поверхностях и высокую точность сборки. В конструкции крана уплотняющее усилие воспринимается теми же шпильками, которые затягивают прокладку 3, уплотняющую сальфонный узел 5 с корпусом, что является недостатком.

В конструкции крана, выполненного по схеме 2 табл. 10-5 (рис. 10-9 и 10-10), обеспечивается постоянное давление на уплотняющие поверхности в закрытом состоянии, за счет чего резко увеличивается срок службы [58]. Кран состоит из корпуса 1 с цилиндрическим уплотняющим пояском и кривошипно-шатунного механизма привода, включающего шток 2 с медным клапаном 3, кривошип 4, шатун 5 и эксцентриковый палец шатуна 6. Шток уплотняется с корпусом с помощью сальфона, изготовленного из нержавеющей стали.

Эксцентриковый палец связан с рычагом 7, на который воздействует пружина 8, упирающаяся одним концом в шатун. При вращении кривошипа (вручную или

с помощью электропривода), выполненного в виде эксцентрика, смонтированного на опорах качения, шток перемещается вдоль направляющей втулки, жестко связанной с корпусом. Вблизи верхнего мертвого положения кривошипно-шатунного механизма происходит уплотнение клапана по цилиндрическому пояску корпуса. Экс-

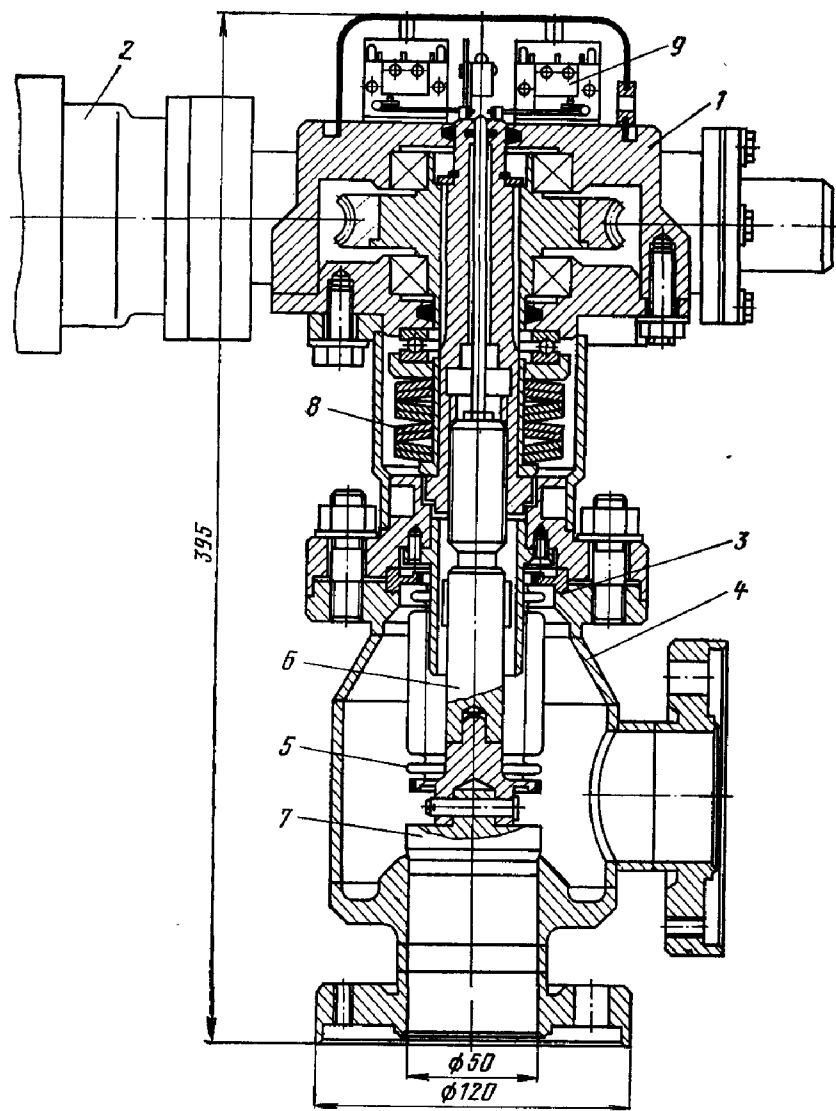


Рис. 10-8. Цельнометаллический кран с электромеханическим приводом.

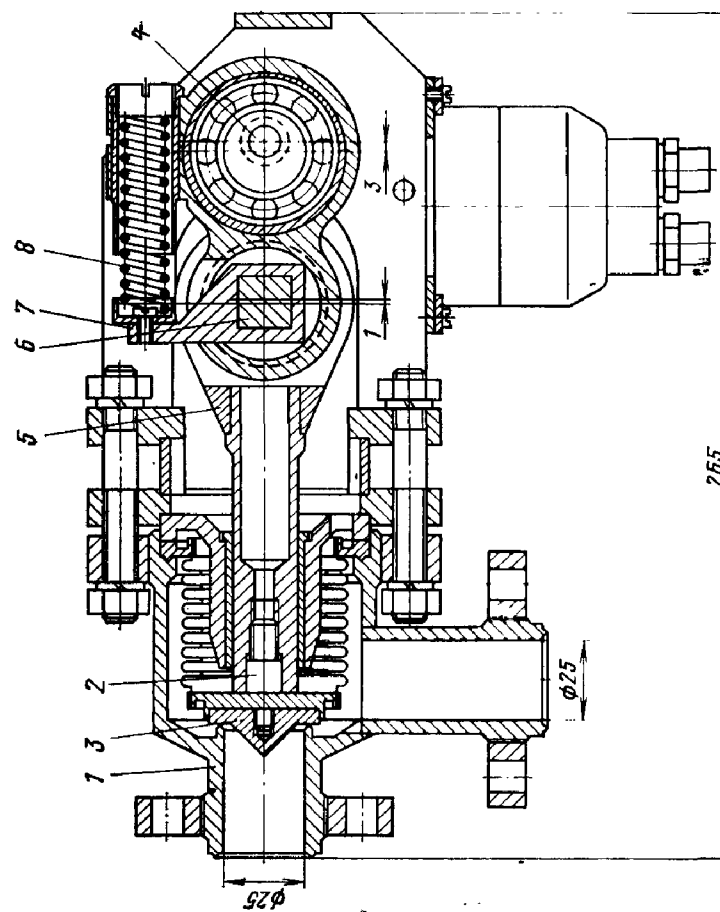
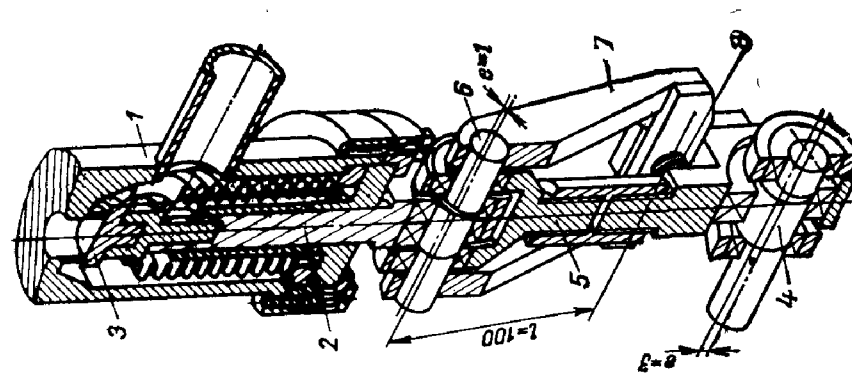


Рис. 10-9. Принципиальная схема крана с кривошипно-шатунным механизмом перемещения штока.

Рис. 10-10. Цельнометаллический кран с большим сроком службы. 1 — корпус; 2 — шток; 3 — медный клапан; 4 — кривошип; 5 — шатун; 6 — эксцентриковый палец; 7 — рычаг; 8 — пружина.



центриковый палец установлен таким образом, что ось опор качения, находящихся в шатуне 5, смещена влево в направлении, перпендикулярном направлению перемещения штока относительно оси опор качения пальца 6, связанных со штоком. На цилиндрических цапфах эксцентрикового пальца 6 жестко закреплен П-образный рычаг. Таким образом, эксцентриситет пальца 6 ($t=1$ мм) образует малое, а рычаг 7 ($l=100$ мм) — большое плечо двуплечего рычага. Благодаря наличию двуплечего рычага осевое усилие, возникающее на клапане, воспринимается в итоге пружиной 8, которая может быть рассчитана на усилие, меньшее усилия уплотнения во столько раз, во сколько раз эксцентриситет пальца 6 меньше расстояния от оси вращения рычага 7 до оси действия пружины. За счет того, что опоры двуплечего рычага выполнены на шарикоподшипниках и трение в них мало, обеспечивается практически постоянное давление клапана на цилиндрический уплотняющий поясok корпуса даже при разных температурных удлинениях корпуса, штока и элементов привода.

Угол поворота рычага 7 ограничивается упором, жестко закрепленным на шатуне 5.

В электромеханическом приводе крана используется мальтийский механизм, что позволяет легко осуществлять фиксацию крана в крайних положениях и исключить поломку деталей устройства в случае отказа конечных выключателей.

10-4. БЛОЧНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ВАКУУМНОЙ КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ

Современные вакуумные системы содержат, кроме средств откачки, большое количество коммутирующей аппаратуры и соединительных трубопроводов. Так, например, для откачки электровакуумного прибора на обычном посту с помощью пароструйного диффузионного и механического вакуумного насоса необходимо иметь три отдельных вакуумных крана, которые должны открываться и закрываться в определенной последовательности. При этом затруднена необходимая взаимная блокировка кранов, а габариты вакуумной системы в целом получаются значительными. Стремление упростить обслуживание и исключить возможные ошибки оператора при работе с кранами заставляет компоновать коммути-

рующие элементы в едином блоке с жесткой последовательностью переключений.

Широкое применение блоки кранов получили в современных автоматизированных технологических установках, предназначенных для обработки электронных приборов [53]. Наиболее совершенные блоки в этом

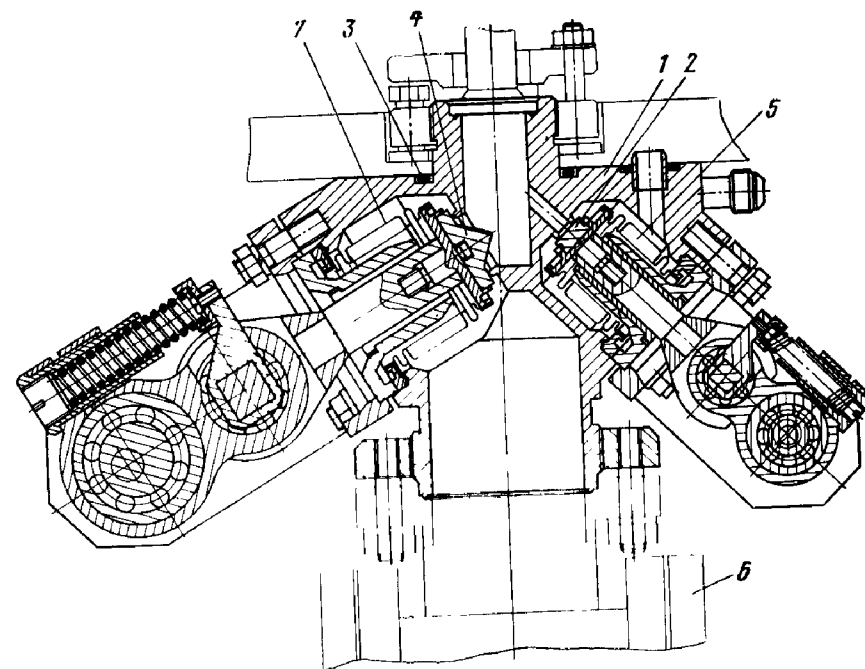


Рис. 10-11. Автоматизированный цельнометаллический блок кранов.

случае, кроме коммутирующих элементов, часто объединяют датчики общего и парциального давлений, устройства для измерения газового потока и откачное гнездо для присоединения изделия. Один из блоков кранов [66], используемый в автоматизированном сверхвысоковакуумном посту откачки приборов и карусельном сверхвысоковакуумном полуавтомате [59], показан на рис. 10-11.

Блок кранов, скомпонованный с магнитным электроразрядным насосом 6, подвешивается к водоохлаждаемой плите и при установке на постах, работающих по системе «вакуум в вакууме», уплотняется с плитой через резиновый уплотнитель 3.

На верхнем торце корпуса блока 1 укрепляется откачное гнездо с механизмом уплотнения металлического

Устройства аварийного перекрытия трубопроводов

штенгеля (на рисунке не показано). Предварительная откачка изделия до давления примерно 1 Па производится через кран 2 магистралями централизованной форвакуумной системы, а высоковакуумная откачка до давления $(1-5) \cdot 10^{-6}$ Па — через кран 4 насосом 6. Краны 2 и 4 имеют одинаковое конструктивное исполнение, уплотняются с помощью металлических сильфонов 5 и 7 и отличаются лишь размерами. Принцип действия кранов аналогичен принципу действия крана, показанного на рис. 10-9.

Блок имеет единый моторный привод, в кинематических цепях которого применены два четырехпазовых мальтийских механизма с общим водилом. Применение мальтийских механизмов позволяет простейшим образом обеспечить необходимую последовательность срабатываний и взаимную блокировку кранов, а также исключает необходимость в точной остановке ведущего вала.

10-5. УСТРОЙСТВА АВАРИЙНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

В большинстве вакуумных систем для перекрытия трубопроводов в случае аварий (обесточивание систем, выход из строя вспомогательного насоса, внезапное натекание) чаще всего применяют электромагнитные клапаны, схемы которых приведены в табл. 10-2.

Система аварийного закрытия обычно включает манометрический преобразователь, блокировочный вакуумметр и исполнительный элемент — клапан. Время срабатывания такой системы в лучшем случае составляет 0,1с. Так как клапаны с большим ДУ должны иметь магнит со значительным числом ампер-витков, а следовательно, с большой индуктивностью, основной вклад во время срабатывания системы вносит сам клапан. Меньшее время срабатывания обеспечивают специально разработанные устройства, принципиальные схемы которых приведены в табл. 10-6.

Малое время срабатывания и высокая надежность устройства для аварийного перекрытия трубопроводов приобретают особую важность при использовании этих устройств в централизованных форвакуумных системах (ЦФС), так как несрабатывание аварийного устройства приводит к выходу из строя всей ЦФС с подключенными к ней установками.

Номер схемы	Наименование	Схема	Время срабатывания, с	Примечание
1	Клапан с магнитной защелкой и ручным взводом		0,05— $4 \cdot 10^{-2}$	Применяется в технологических установках и в ЦФС
2	Электромагнитный клапан с дистанционным взводом		0,08— 0,1	То же
3	Защитное устройство с акустической задержкой		—	Применяется в ЦФС

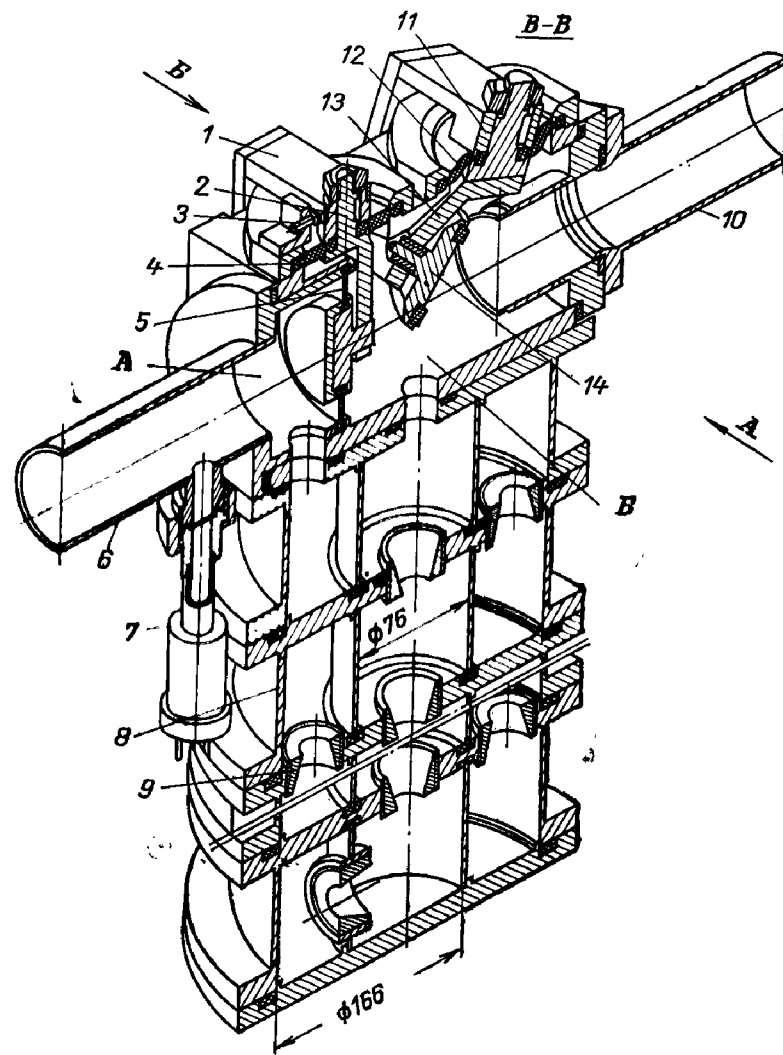
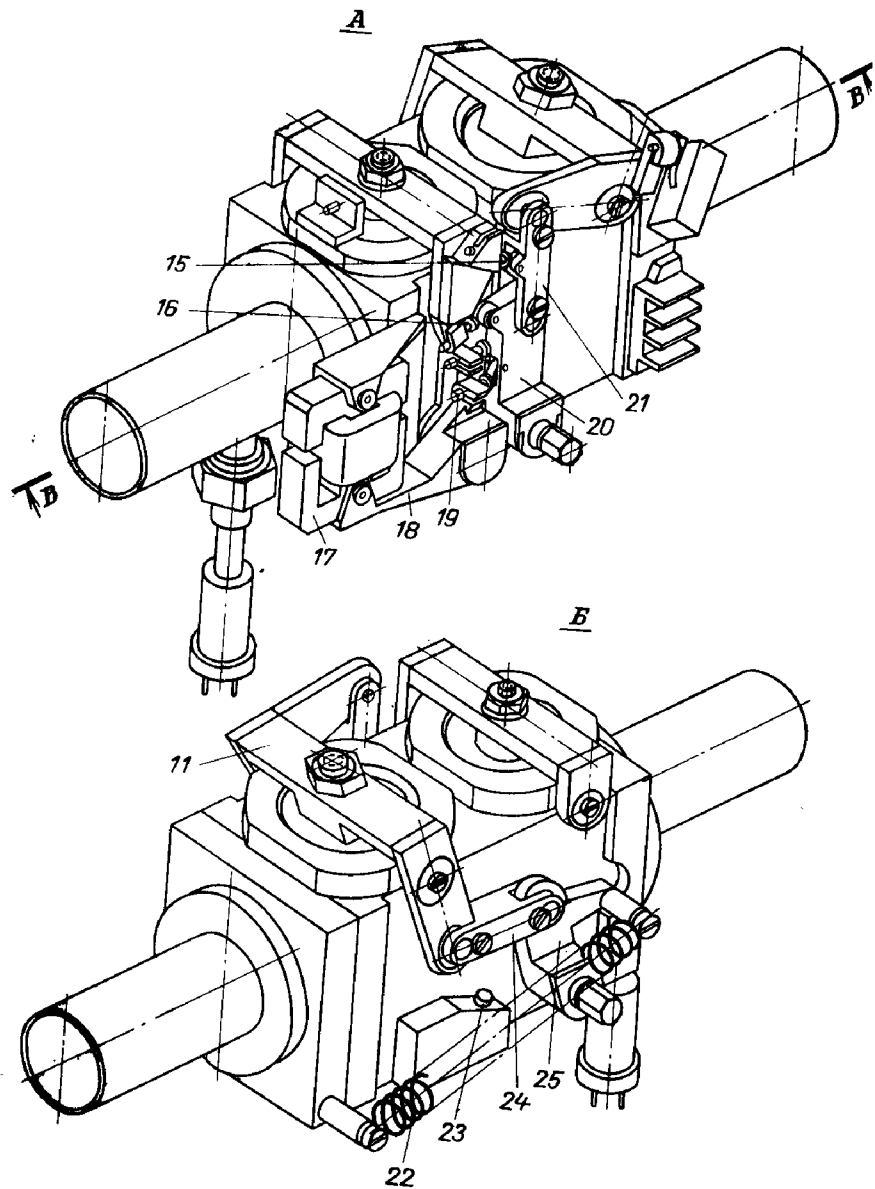


Рис. 10-12. Защитное устройство с акустической задержкой.

1, 11 — скобы; 2, 13, 18, 20, 25 — рычаги; 3, 15, 16, 19, 23 — упоры; 4, 12 — резиновые диафрагмы; 5 — резиновая мембрана; 6, 10 — патрубки; 7 — датчик давления; 8 — коаксиальная камера; 9 — сопло; 14 — клапан; 17 — электромагнит; 21 — серьга; 22 — пружина; 24 — тяга; А, В — камеры.

брану, которая, прогибаясь вправо, через рычаг 2 и скобу 1 нажимает упором 16 на рычаг 20. За счет этого четырехзвенник, состоящий из скобы 11, рычага 20 и серьги, под действием пружины складывается, заставляя распрямляться другой четырехзвенник, состоящий из скобы 11, тяги 24 и рычага 25. При этом происходит надежное уплотнение тарелки клапана 14 по седлу.

При прорыве воздуха со стороны магистрали централизованной форвакуумной системы мембрана прогибается влево. При этом упор 15 воздействует на серьгу, вследствие чего клапан также закрывается.

При постепенном повышении давления в откачиваемом объеме или магистрали централизованной форвакуумной системы (медленные натекания) перепада давлений на резиновой мембране 5 недостаточно для срабатывания устройства. В этом случае закрытие клапана происходит в результате срабатывания электромагнита 17, который через рычаг 18 воздействует регулируемым упором 19 на рычаг 20. Управление электромагнитом осуществляется с помощью блокировочного вакуумметра и манометрического преобразователя 7. Время закрытия клапана составляет около 0,1 с, в то время как прорвавшийся в камеру А воздух проходит все камеры 8 линии акустической задержки за 0,2—0,3 с. Следует учитывать, что при прорыве воздуха со стороны форвакуумной магистрали давление в вакуумном объеме несколько повысится, однако, как показал опыт эксплуатации централизованных форвакуумных магистралей, такого рода аварии случаются чрезвычайно редко.

При длине камер, равной 80 мм, четыре камеры обеспечивают достаточную для надежного закрытия клапана задержку поступления воздуха в камеру Б из камеры А.

Количество камер и диаметры отверстий в соплах 9 подобраны таким образом, чтобы наряду с достаточной задержкой поступления воздуха не слишком уменьшать проводимость устройства.

В описываемой конструкции проводимость защитного устройства составляет 3—4 л/с при среднем давлении в системе 7,5 Па.

Защитное устройство, выполненное по схеме 4 табл. 10-6, обеспечивает более надежную защиту, чем описанные выше. Однако существенными недостатками этого устройства являются необходимость непрерывного вращения кулачкового вала, управляющего клапанами,

и связанный с этим ускоренный износ резиновых уплотнителей.

Устройство состоит из двух последовательно соединенных камер, на выходе каждой из которых установлены поочередно открывающиеся клапаны. При вращении кулачкового вала 3 камера 2 поочередно соединяется с ЦФС либо с камерой 1. Открытое положение клапана камеры 2 соответствует откачке газа ЦФС. При открытом положении клапана камеры 1 давление в обеих камерах выравнивается. Таким образом, откачиваемый объем никогда не соединен непосредственно с ЦФС. Повышение давления в одной из камер приводит к остановке кулачкового вала, и, следовательно, во всех аварийных случаях откачиваемый объем оказывается изолированным от ЦФС [54].

10-6. УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАПУСКА ГАЗА В ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ (НАТЕКАТЕЛИ)

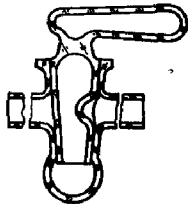

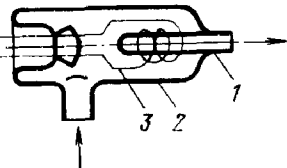
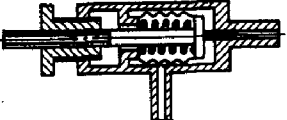
При работе с газоанализаторами, испытаниях различной вакуумной аппаратуры, а также в ряде других случаев бывает необходимо создавать дозированный поток газа в вакуумный объем. Для этого применяют устройства, основные принципиальные схемы которых приведены в табл. 10-7.

В лабораторной практике и мелкосерийном электровакуумном производстве нашли применение стеклянные порционные или капиллярные двухходовые краны (схема 1 табл. 10-7).

Основными недостатками стеклянных кранов являются их малая надежность, необходимость применения смазки и трудность автоматизации процесса напуска газа.

В устройствах, выполненных по схеме 2 табл. 10-7, либо применяют пористые материалы (керамику, металлокерамику, стекла), натекание через которые регулируется перекрытием легкоплавким материалом части поверхности, либо используют явление диффузии некоторых газов через материал. Наиболее распространенный гелиевый диффузионный натекатель нашел применение главным образом для калибровки гелиевых масс-спектрометрических теческателей. Принцип действия диффузионного натекателя основан на значительной и постоянной во времени диффузии гелия даже при комнатной темпе-

Устройства для напуска газа в вакуумные системы (натекатели)

Номер схемы	Наименование	Схема	Область применения	Примечание
1	Стекланный двухходовой кран		Наполнение газонаполненных приборов до заданного давления	—
2	Диффузионный натекатель		Калибровка гелиевых масс-спектрометрических течеискателей. Калибровка датчиков давления, потокомеров	Материал перегородки — кварц или материалы с определенной проводимостью (пористая керамика, стекло и т. п.)
3	Термодиффузионный натекатель		Напуск чистых газов в вакуумные системы	Материал перегородки чаще всего серебро, никель, палладий
4	Игольчатый натекатель		Напуск любых газов и их смесей в вакуумные системы	Наименьший поток напускаемого газа $1,3 \cdot 10^{-8}$ м ³ ·Па/с, наибольший— $7 \cdot 10^{-2}$ м ³ ·Па/с.

ратуре через кварцевую трубку 2, впаянную в стеклянный баллон 1, заполненный гелием.

Работа термодиффузионных натекателей (схема 3 табл. 10-7) основана на повышенной избирательной диффузии газов через некоторые материалы при их нагреве. Например, если палладиевую трубку 1, закрытую с одного конца, с другого через какой-либо переход спаять со стеклянной трубкой 2, то ее можно использовать как фильтр, пропускающий только чистый водород; последний диффундирует через стенки трубки 1, нагретой нагревателем 3 до температуры выше 750 К. С этой же целью можно использовать также нагретые никель, железо, платину, хотя скорость диффузии водорода через эти материалы меньше, чем через палладий.

Для напуска чистого кислорода обычно используют серебряную трубку, также нагреваемую до высокой температуры. Скорость диффузии газов в термодиффузионных натекателях определяется разностью давлений и температурой металлической перегородки. Значительным преимуществом диффузионных и термодиффузионных натекателей является высокая степень чистоты напускаемых газов и возможность автоматизации процесса напуска.

В игольчатых натекателях, выполненных по схеме 4 табл. 10-7, поток газа регулируется погружением тонкой стальной иглы в отверстие медного седла. Игольчатые натекатели позволяют регулировать поток газа в пределах от $1 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ м³·Па/с.

Кроме схем устройств, приведенных в табл. 10-7, часто в вакуумной технике для напуска определенного газа используют так называемые генераторы газа — вещества, легко разлагающиеся при изменении внешних условий. Например, напуск кислорода в объем может быть осуществлен при нагреве до 500—550 К марганцовокислого калия, перекиси бария, закиси меди и других богатых кислородом соединений.

10-7. ЗОЛОТНИКИ

Золотник является коммутирующим элементом в карусельных откачных машинах и представляет собой прижатые друг к другу диски с притертыми торцевыми поверхностями. Один из дисков неподвижен, а другой периодически поворачивается с каруселью откачной ма-

шины. На притертых поверхностях дисков золотников имеются отверстия, периодически совмещающиеся при остановке карусели.

Отверстия в подвижном диске соединены с частью вакуумной системы, размещенной на карусели, а отверстия неподвижного диска соединены со стационарной вакуумной системой.

В табл. 10-8 приведены принципиальные схемы наиболее распространенных конструкций золотников.

Диски золотника, изготовленного по схеме 1 табл. 10-8, плоские. Для предотвращения натекания по плоскости разъема золотника применены кольцевые канавки, откачиваемые механическим вакуумным насосом или заполняемые вакуумным маслом.

На рис. 10-13 показан золотник с плоскими дисками 1 и 2 (схема 2 табл. 10-8) с периферийными канавками,

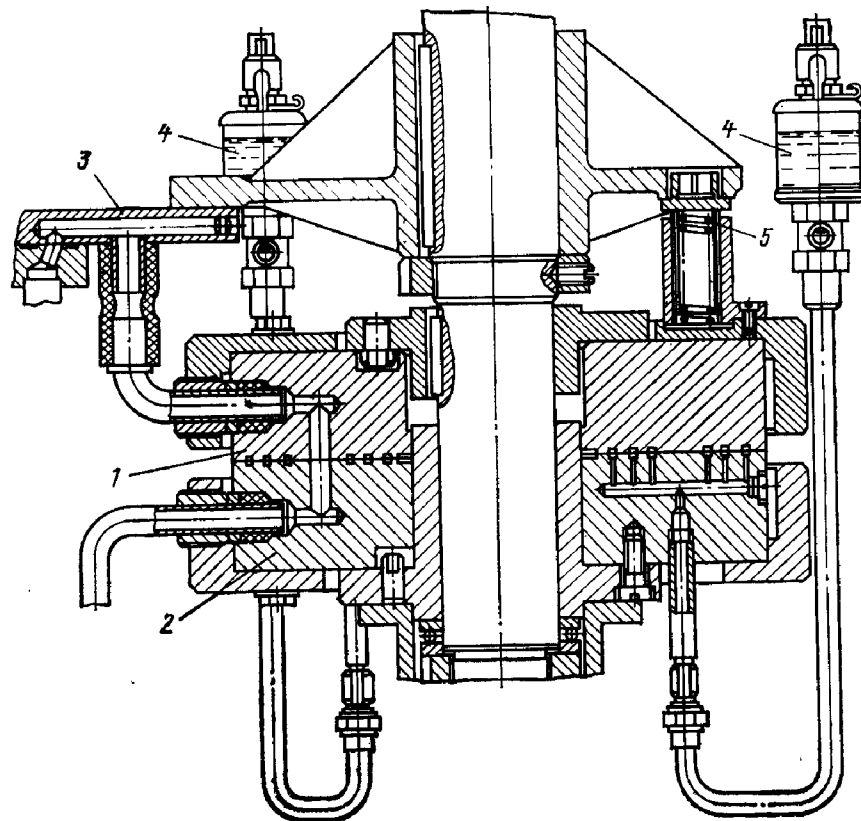


Рис. 10-13. Золотник с плоскими дисками.

ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

11-1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

в которые поступает вакуумное масло из масленки 4. Для более надежного прилегания дисков применены пружины 5. Подвижный диск 1 резиновыми шлангами соединен с откачными гнездами 3.

Таблица 10-8

Схемы золотников карусельных откачных машин

Номер схемы	Наименование	Схема	Область применения
1	Золотник с плоскими дисками и кольцевыми канавками		Карусельные машины для откачки электровакуумных приборов средней мощности
2	Золотник с плоскими дисками и масляным затвором		Карусельные машины для откачки ПУЛ
3	Золотник со сферическими дисками		Карусельные машины для откачки ПУЛ, электрических ламп накаливания

Вакуумные насосы по принципу действия можно классифицировать следующим образом (табл. 11-1):

1) насосы объемного действия, которые осуществляют процесс откачки за счет периодического изменения объема рабочей камеры (водокольцевые, механические, двухроторные);

2) насосы эжекторные, которые осуществляют откачку за счет захвата газа струей рабочей жидкости или пара (пароструйные насосы, парозжекторные насосы);

3) насосы молекулярные, которые осуществляют процесс откачки за счет сообщения молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости в определенном направлении. Насосы этого типа могут быть *струйными*, в которых направленная дополнительная скорость сообщается молекулам откачиваемого газа непрерывно истекающей струей пара или газа, и *молекулярными*, в которых эта скорость сообщается движущимися поверхностями твердого тела;

4) насосы сорбционные, которые осуществляют процесс откачки за счет способности ряда материалов поглощать газы и пары (адсорбционные, геттерные, испарительные, ионно-геттерные, магнитные электроразрядные насосы);

5) насосы криогенные, которые осуществляют процесс откачки за счет конденсирования откачиваемых газов и паров при низких температурах (конденсационные и криосорбционные насосы).

При выборе насоса для конкретной вакуумной системы обычно руководствуются следующими основными параметрами: *наибольшим давлением запуска, наибольшим выпускным давлением, предельным остаточным давлением, быстротой действия и производительностью.*

Наибольшее давление запуска $p_{нач}$ — давление во входном сечении вакуумного насоса, при котором насос может начать работу. По этому параметру все насосы можно подразделить на две большие группы:

а) насосы, которые откачивают пары и газы из объема с первоначальным атмосферным давлением; к ним

Более надежное уплотнение дисков золотника может быть достигнуто при комбинации периферийного масляного затвора и канавок с промежуточной откачкой. Диски золотника, изготовленного по схеме 3 табл. 10-8, имеют сферические поверхности и могут самоустанавливаться, но более сложны в изготовлении. Диски золотников чаще всего изготавливаются из стали 20Х. Рабочие поверхности золотников цементируются, калятся и тщательно притираются.

Основные параметры и области применения вакуумных насосов

Принцип действия	Наименование насоса	Давление, Па		Рабочий диапазон давлений, Па	Быстрота действия, л/с	Области применения насосов
		полное	остаточное			
Насосы объемного действия	Водокольцевые	4000—6650	2400—4000	$1,03 \times 10^5$ — 4×10^4	1—800	Установки вакуумной сушки. Откачка черновых трубопроводов ЦФС. Создание предварительного разрежения в безмасляных вакуумных системах
	Механические вакуумные насосы с масляным уплотнением: одноступенчатые	2—6,6	0,27—0,66	$1,03 \times 10^5$ — $2 \cdot 10^4$	0,5—500	Создание предварительного разрежения в вакуумных системах и в насосах, которые для своей работы требуют поддержания определенного разрежения
	двухступенчатые	0,66—2	10^{-3} — $6,6 \times 10^{-2}$	$1,03 \times 10^5$ — $0,66 \times 10^5$	0,2—50	
	Механический вакуумный насос с деформируемой камерой	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,03 \times 10^5$ — 10^{-1}	0,5—2	Установки вакуумной пропитки материалов. Установки для дистилляции в вакууме Создание предварительного разрежения в безмасляных вакуумных системах

Продолжение табл. 11-1

Принцип действия	Наименование насоса	Давление, Па		Рабочий диапазон давлений, Па	Быстрота действия, л/с	Области применения насосов
		полное	остаточное			
Насосы объемного действия	Многопластинчатые	2000—3300	2000—3300	$1,03 \times 10^5$ — 2×10^4	2—12000	Создание предварительного разрежения в больших объемах Откачка магистралей ЦФС
	Двухроторные: одноступенчатые двухступенчатые	0,66 10^{-3} — 10^{-2}	$6,6 \cdot 10^{-2}$ 10^{-4} — 10^{-3}	100—0,66 $100 \cdot 10^{-3}$	15— $4 \cdot 10^5$ 5—50	
Эжекторные	Водоструйные	1000—6650	—	$1,03 \cdot 10^5$ —1000	0,1—300	Применяются в качестве самостоятельных насосов или насосов предварительного разрежения в системах безмасляного вакуума
	Пароэжекторные: низковакуумные	100	—	$1,03 \cdot 10^5$ —100	5— 10^5	То же

Принцип действия	Наименование насоса	Давление, Па		Рабочий диапазон давлений, Па	Быстрота действия, л/с	Области применения насосов
		полное остаточное	остаточное			
Эжекторные	средневакуумные	$10^{-1}-1,0$	—	$1,03 \times 10^2-10^{-1}$	10^2-10^5	Применяются в качестве самостоятельных насосов или насосов предварительного разрежения в системах безмасляного вакуума
Молекулярные	Пароструйные; бустерные	10^{-2}	—	$10-10^{-2}$	$200-3 \cdot 10^4$	Используются совместно с механическими вакуумными насосами. Создание предварительного разрежения в больших объемах. Применяются в качестве вспомогательных насосов для диффузионных высоковакуумных насосов
	диффузионные паромасляные	$6,6 \cdot 10^{-7}$	10^{-9}	$10^{-2}-6,6 \times 10^{-7}$	$5-2 \cdot 10^5$	Широко применяются в самых различных установках для создания высокоого и сверхвысокого вакуума
	диффузионные парортутные	—	$10^{-4}-10^{-10}$	$10-10^{-10}$	$5-10^4$	В некоторых промышленных откатных постах и лабораторных установках для создания безмасляного вакуума. Посты откатки ртутных выпрямителей

Принцип действия	Наименование насоса	Давление, Па		Рабочий диапазон давлений, Па	Быстрота действия, л/с	Области применения насосов
		полное остаточное	остаточное			
Молекулярные	Турбомолекулярные	—	$10^{-7}-10^{-9}$	$1,0-10^{-7}$	$50-10^4$	Откатка магистралей ЦФС. Установки вакуумного отжига. Установки для электрофизических исследований. Установки имитации космического пространства. Установки электровакуумного и полупроводникового производства
Сорбционные	Адсорбционные	—	—	—	—	Применяются для создания безмасляного вакуума в технологических и исследовательских установках как самостоятельные насосы, так и для получения предварительного разрежения для других сверхвысоковакуумных насосов

Принцип действия	Наименование насоса	Давление, Па		Рабочий диапазон давлений, Па	Быстрота действия, л/с	Области применения насосов
		полное остаточное	остаточное			
	Геттерные испарительные Геттерные электродуговые	—	10^{-7} — 10^{-11}	1 — 10^{-11}	2 — $2 \cdot 10^4$	Для откачки больших технологических объемов Для откачки технологических установок с большим газовойделением
	Ионно-геттерные	—	10^{-7} — 10^{-11}	10^{-2} — 10^{-11}	2 — $5 \cdot 10^4$	То же
	Магнитные электроразрядные	—	10^{-7} — 10^{-9}	10^{-1} — 10^{-9}	$0,02$ — 10^4	Широко применяются для откачки электронных приборов
Криогенные	Конденсационные	—	10^{-7} — 10^{-9}	$1,03 \times 10^5$ — 10^{-9}	50 — 10^5 и больше	Создание предварительного разрежения в небольших объемах. Откачка крупных объемов до сверхвысокого вакуума
	Криосорбционные	—	10^{-10} — 10^{-13}	10^{-1} — 10^{-13}	500 — $1 \cdot 10^3$ и больше	Создание безмасляного вакуума в промышленных и исследовательских установках

относятся механические вакуумные, парожетторные, водоструйные и подобные им насосы;

б) насосы, которые для своей работы требуют предварительного разрежения всей вакуумной системы, включая сам насос; это молекулярные, сорбционные и другие насосы.

Предварительное разрежение для этих насосов обычно создается насосами первой группы, для которых наибольшее давление запуска $p_{нач}$ равно атмосферному. Для удобства эксплуатации насосов второй группы их часто объединяют в агрегаты с насосами первой группы.

Наибольшее выпускное давление $p_{наиб}$ — давление в выходном сечении вакуумного насоса, при котором насос еще может нормально работать. Этот параметр особенно важен для высоковакуумных диффузионных насосов, у которых превышение наибольшего выпускного давления 10^2 — 1 Па может привести к разрушению паровой струи и заносу большого количества пара в откачиваемый объем. Отметим, что наибольшее выпускное давление диффузионных насосов практически совпадает с наибольшим давлением запуска.

У двухроторных и турбомолекулярных насосов происходит плавное изменение выпускного давления в зависимости от выпускного, и понятием наибольшего выпускного давления для этих насосов обычно не пользуются.

Предельное остаточное давление $p_{ост}$ — предельно низкое давление, которое достигается насосом при работе без нагрузки, т. е. когда на вход насоса не поступают извне газы или пары.

Невозможность беспредельного понижения давления обусловлена тем, что в каждом реальном насосе всегда существует обратный поток газов и паров со стороны выпускного патрубка на вход насоса. Обратный поток может состоять из паров рабочей жидкости, газов, выделяющихся из конструкционных материалов, рабочей жидкости, прорывающейся через механизм насоса, и газов, натекающих из окружающей среды через неплотности. С понижением давления поток откачиваемого газа в насос уменьшается, в то же время обратный поток остается практически неизменным; поэтому наступает момент, когда эти потоки становятся одинаковыми и давление на входе насоса перестает понижаться. Это и есть предельное остаточное давление, достигаемое насосом.

У большинства насосов при достижении остаточного давления, кроме остаточных газов, на входе имеются и конденсирующиеся пары, в связи с чем различают *полное остаточное давление*, т. е. сумму парциальных давлений остаточных газов и паров, и *давление остаточных газов*.

У насосов, использующих рабочие жидкости (насосы с масляным уплотнением, паромасляные), полное остаточное давление определяется составом и состоянием рабочей жидкости и обычно на порядок выше давления остаточных газов, которое зависит от конструкции и качества изготовления насоса. Для таких насосов в паспорте указываются оба значения. Очевидно, если откачиваемый объем не защищен от проникновения паров рабочей жидкости насоса какой-либо ловушкой (см. гл. 12), предельное остаточное давление в откачиваемой системе не может быть ниже полного остаточного давления насоса.

У насосов без рабочей жидкости (турбомолекулярные, сорбционные, конденсационные) остаточное давление конденсирующихся паров, как правило, пренебрежимо мало по сравнению с давлением остаточных газов, и для таких насосов в паспорте приводится полное остаточное давление, измеряемое без защиты манометров охлаждаемыми ловушками.

Быстрота действия S_n определяется объемом газа, проходящего через сечение впускного патрубка насоса в единицу времени при определенном впускном давлении. Она не является постоянной величиной и обычно уменьшается с уменьшением впускного давления. Качество насоса тем лучше, чем шире диапазон давлений, в пределах которого быстрота действия насоса мало изменяется. При достижении предельного остаточного давления быстрота действия становится равной нулю. Для каждого типа насосов существует кривая зависимости быстроты действия насоса S_n от давления p :

$$S_n = f(p). \quad (11-1)$$

Производительность насоса Q'_n определяется количеством газа, удаляемым насосом в единицу времени при определенном впускном давлении.

Производительность насоса, так же как и быстрота действия, зависит от впускного давления и при достижении предельного давления приближается к нулю.

Производительность и быстрота действия насоса связаны соотношением

$$S_n = \frac{Q'_n}{p_n}, \quad (11-2)$$

где p_n — давление во входном сечении насоса.

Вакуум-фактор $Х_0$ определяется отношением фактической быстроты действия насоса S_n к теоретической максимально возможной быстроте действия $S_{теор}$:

$$Х_0 = \frac{S_n}{S_{теор}}. \quad (11-3)$$

Теоретическая быстрота действия для воздуха при молекулярном режиме

$$S_{теор} = 11,6A, \text{ л/с,}$$

где A , см², — площадь входного сечения насоса (для диффузионных насосов — площадь диффузионной диафрагмы).

Коэффициент $Х_0$ дает возможность оценить, насколько фактическая быстрота действия отличается от возможного предельного значения.

Для хорошо сконструированного пароструйного диффузионного насоса коэффициент $Х_0$ составляет 0,3—0,5 [79]. В сорбционных насосах коэффициент $Х_0$ сильно зависит от рода откачиваемых газов. Так, в титановых насосах при откачке кислорода $Х_0$ близок к 1. При откачке азота, паров воды и углекислого газа $Х_0 = 0,2 \div 0,5$, а при откачке инертных газов $Х_0 = 1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-2}$.

При выборе насосов следует также учитывать и такие их характеристики, как экономическая эффективность, потребление энергии, охлаждающей воды, расход рабочей жидкости, масса, габариты, частота вращения, уровень шума, вибраций и т. д., а также особенности поведения насосов в различных условиях их эксплуатации. Обычно экономическая эффективность оценивается стоимостью, отнесенной к быстроте действия (первоначальные затраты), и стоимостью эксплуатации, также отнесенной к быстроте действия.

Часто при проектировании вакуумных систем необходимо знать способность насоса откачивать не только воздух, но и другие газы и конденсирующиеся пары; устойчивость насоса к резким повышениям давления на впуске и выпуске и прорывам атмосферного воздуха;

время, необходимое для запуска и остановки насоса; создаваемый насосом уровень загрязнения откачиваемой системы парами рабочей жидкости; состав остаточных газов.

11-2. НАСОСЫ ОБЪЕМНОГО ДЕЙСТВИЯ

Водокольцевые насосы. Водокольцевые насосы относятся к насосам объемного действия. На рис. 11-1 показана схема водокольцевого насоса. При быстром вращении ротора, имеющего радиальные лопатки, вода отбрасывается к периферии и уплотняет полости между отдельными лопатками. Так как ось вращения ротора смещена относительно оси цилиндрической полости статора, при вращении ротора объемы, отсекаемые лопатками, меняются, и, таким образом, осуществляется сжатие откачиваемого газа перед выбросом его в атмосферу через выпускное отверстие.

Предельное давление насоса определяется давлением паров воды и составляет примерно $24 \cdot 10^2$ Па при 293 К.

Механические вакуумные насосы с масляным уплотнением. Механические вакуумные насосы с масляным уплотнением относятся к насосам объемного действия и работают за счет периодического изменения объема рабочей камеры.

Механические вакуумные насосы с масляным уплотнением могут быть пластинчато-роторными, пластинчато-статорными и плунжерными. Принцип действия механических вакуумных насосов широко освещен в [32, 35] и ясен из рассмотрения принципиальных схем, которые приведены на рис. 11-2, а—в.

В процессе работы зазоры между трущимися частями насоса уплотняются рабочей жидкостью — маслом, благодаря чему обратное перетекание газа с выхода на вход насоса становится незначительным.

Масло заполняет и так называемые вредные пространства, из которых газ вытесняется при работе роторного механизма (например, объем под клапаном), и практически исключает их влияние, ведущее к повышению остаточного давления. Одновременно масло обеспечивает смазку и частичное охлаждение механизма насоса.

Остаточное давление и некоторые другие параметры механических насосов с масляным уплотнением в значи-

тельной мере определяются свойствами масла, залитого в насос. Как газы, так и конденсирующиеся пары, создающие обратный поток, попадают на вход насоса из циркулирующего в нем масла. Перед поступлением в камеру насоса масло некоторое время находится в маслорезервуаре, где подвергается воздействию атмосферного воз-

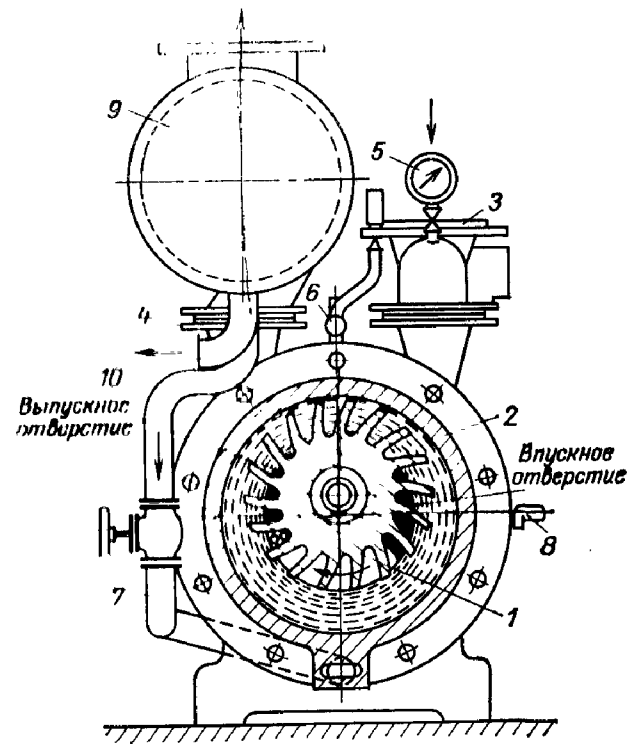


Рис. 11-1. Водокольцевой насос.

1 — ротор; 2 — корпус; 3 — впускная распределительная трубка; 4 — выпускной патрубок; 5 — манометр; 6 — подводка воды; 7 — подводка циркуляционной воды с регулирующим краном; 8 — спускной кран; 9 — водостойник; 10 — сток охлаждающей воды.

духа и поглощает газы. При поступлении масла в рабочую камеру поглощенные ранее газы выделяются из пленки масла и поступают на вход насоса. Поэтому количество циркулирующего в насосе масла целесообразно свести к минимуму за счет уменьшения вредного пространства и зазоров в роторном механизме.

Кроме того, в насосе происходит крекинг масла из-за возникновения высоких местных температур в областях контактов трущихся поверхностей, которые не полностью

разделены слоем масла. Легколетучие продукты крекинга масла также проникают на вход насоса и увеличивают остаточное давление.

У одноступенчатых насосов с масляным уплотнением остаточное давление составляет обычно $(2,7-6,6) \times 10^{-1}$ Па, а полное давление 2—6,6 Па.

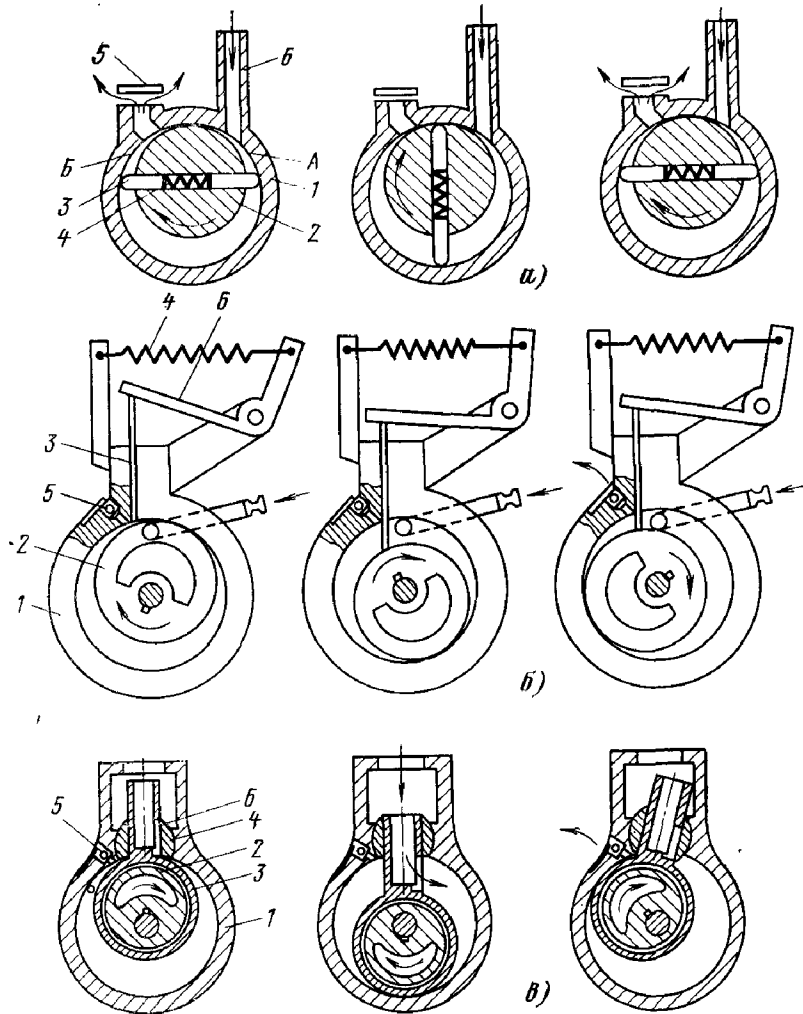


Рис. 11-2. Схема работы вращательных насосов.

a — пластинчато-роторный насос: 1 — статор; 2 — ротор; 3 — пластина; 4 — пружина; 5 — выпускной клапан; 6 — впускной патрубок; *b* — пластинчато-статорный насос: 1 — статор; 2 — ротор; 3 — разделительная пластина; 4 — пружина; 5 — выпускной клапан; 6 — рычаг; *в* — плунжерный насос: 1 — статор; 2 — эксцентрик; 3 — плунжер; 4 — золотник; 5 — выпускной клапан; 6 — отверстие.

Для получения давлений остаточных газов ниже 10^{-1} Па используют двухступенчатые насосы с масляным уплотнением.

Схема такого насоса показана на рис. 11-3. Ближайшая к откачиваемому сосуду высоковакуумная ступень *I* должна создавать небольшой перепад давлений (около 0,1 Па) и поэтому не нуждается в масляном уплотнении, так как при низком давлении уплотнение достигается за счет большого сопротивления узких зазоров.

Ступень *I* в процессе работы обычно не сообщается с масляным резервуаром ступени *II*, и в нее не заносится воздух, растворенный в масле, благодаря чему и возможно достижение более низкого остаточного да-

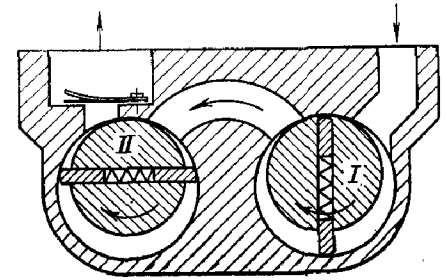


Рис. 11-3. Схема двухступенчатого насоса с масляным уплотнением.

вления. Так, давление остаточных газов в лучших образцах двухступенчатых насосов составляет 10^{-3} Па, а полное остаточное давление $6,6 \cdot 10^{-1}$ Па. Вообще у насосов с масляным уплотнением давление остаточных газов в основном определяется качеством изготовления.

Быстрота действия S_H насосов с масляным уплотнением определяется их конструкцией. Различают геометрическую быстроту действия S_T и истинную быстроту действия S_H или просто быстроту действия насоса.

Истинная быстрота действия S_H всегда меньше S_T из-за ограниченной проводимости входных коммуникаций в насосе между отверстием входного патрубка и камерой, а также за счет обратного потока газов. Эта разница становится особенно заметной при приближении к остаточному давлению. Отношение S_H/S_T , называемое объемным к. п. д. насоса, составляет обычно 0,75—0,85 при давлениях более 10^2 Па и уменьшается до нуля при $p_{ост}$.

Быстрота действия насосов объемного действия практически не зависит от рода откачиваемого газа, так как разница в проводимости входных коммуникаций по разным газам очень мало сказывается на быстроте действия насоса.

Мощность, потребляемая насосами с масляным уплотнением, затрачивается на преодоление трения в механизме насоса (мощность трения или мощность потерь) и на процесс перемещения и сжатия газа (индикаторная мощность).

В области низких давлений (ниже 10^3 Па) потребляемая насосом мощность практически остается постоянной и не зависит от давления.

Эта постоянная мощность в области низких давлений и является мощностью потерь.

При откачке влажных газов механическими вакуумными насосами с масляным уплотнением происходит увлажнение масла. При этом масло постепенно превращается в водомасляную эмульсию и предельное давление насоса увеличивается от единиц до сотен паскаль. Поэтому механические вакуумные насосы с масляным уплотнением, выпускаемые в настоящее время, как правило, снабжаются *газобалластными устройствами*, которые осуществляют напуск балластного газа в камеру сжатия для предотвращения конденсации паров при сжатии.

В качестве балластного газа обычно используется атмосферный воздух, поступающий в камеру через отдельное отверстие с обратным клапаном, связанное с краном-дозатором трубкой или сверлением в корпусе.

В камере газобалластного насоса сжимается смесь паров с балластным газом, причем количество балластного газа определяется из условия, чтобы к моменту достижения смеси давления выхлопа парциальное давление паров не достигало давления насыщения (рис. 11-4), т. е. чтобы выполнялось условие

$$p_6 + (p_r + p_n) \frac{V_{вс}}{V_{сж}} \geq p_{вып} p_n \left(\frac{V_{вс}}{V_{сж}} \right) \leq p_{нас}, \quad (11-4)$$

где p_6 — давление сжатого балластного газа; p_r — давление газа во входном сечении насоса; p_n — давление пара во входном сечении насоса; $p_{нас}$ — давление насыщенного пара при рабочей температуре насоса; $p_{вып}$ — выпускное давление насоса; $V_{вс}$ — объем рабочей камеры в момент «конец всасывания»; $V_{сж}$ — объем рабочей камеры в момент «конец сжатия».

Условие (11-4) справедливо при изотермическом процессе сжатия в насосе, что не совсем строго для реаль-

ного насоса, но позволяет легко определить поток балластного газа Q'_6 , необходимый для предотвращения конденсации:

$$Q'_6 \geq S_n \left(p_{вып} \frac{p_n}{p_{нас}} - p_r - p_n \right) = S_n p_n \left[\left(\frac{p_{вып}}{p_{нас}} - 1 \right) - \frac{p_r}{p_n} \right]. \quad (11-5)$$

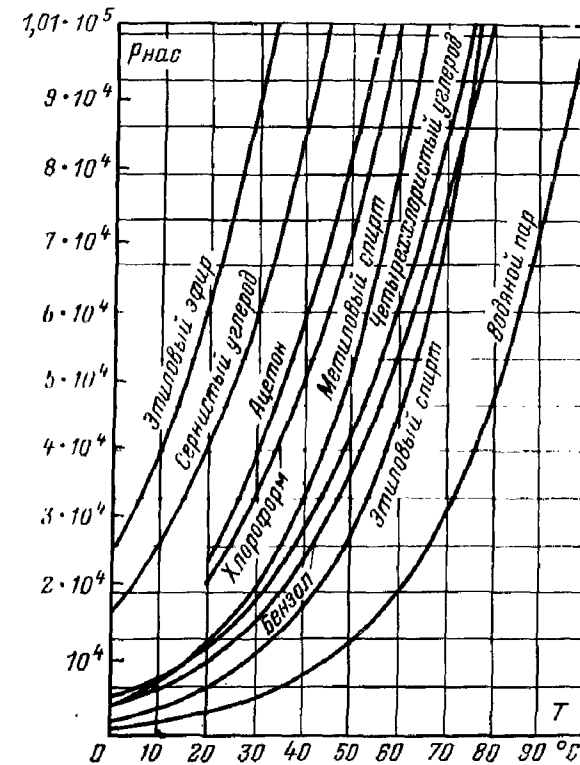


Рис. 11-4. Зависимость давления насыщенных паров от температуры для некоторых веществ.

В случае откачки только конденсируемых паров ($p_r \approx 0$) формула (11-5) упрощается:

$$Q'_6 \geq S_n p_n \left(\frac{p_{вып}}{p_{нас}} - 1 \right). \quad (11-6)$$

Из уравнения (11-5) следует, что поток балластного газа Q'_6 должен быть тем больше, чем больше быстрота действия S_n насоса, чем больше давление пара p_n на входе и чем меньше давление насыщенных паров, т. е.

чем меньше температура масла в насосе. Отметим, что если давление насыщенных паров $p_{нас}$ численно равно выпускному давлению $p_{вып}$, насос не требует балластного газа для предотвращения конденсации. Например, насос со специальным маслом, работающий при температуре примерно 380 К, способен откачивать пары воды без подачи балластного газа.

Допустимое давление паров воды на входе является паспортной характеристикой газобалластного насоса.

Другой важной характеристикой газобалластного насоса является количество (масса) паров, которое он откачивает в единицу времени при заданном давлении паров на входе, т. е. *массовая производительность* $M'_п$ насоса по откачиваемому пару. Ее легко подсчитать, представив уравнение состояния (1-18) для откачиваемой в единицу времени порции пара в виде

$$p_п S_п = \frac{M'_п}{M} R_0 T, \quad (11-7)$$

откуда следует:

$$M'_п = \frac{MS_п p_п}{R_0 T}, \text{ г/с} = \frac{3,6MS_п p_п}{R_0 T}, \text{ кг/ч}, \quad (11-8)$$

где M — молекулярная масса пара; $S_п$ — быстрота действия насоса, л/с; $p_п$ — давление пара на впуске, Па; $R_0 = 8,3 \cdot 10^3$ Дж/(К·кмоль) — универсальная газовая постоянная; T — температура пара, К.

Для паров воды ($M=18$) при $T=293$ К массовая производительность насоса определяется формулой

$$M'_п = 2,67 \cdot 10^{-5} S_п p_п, \text{ кг/ч}. \quad (11-9)$$

Формулы (11-8) и (11-9) справедливы, конечно, только в том случае, если масло при откачке не загрязняется конденсатом, т. е. остаточное давление насоса по откачиваемым парам $p_{п.ост} = 0$. В противном случае, если масло загрязняется конденсатом (например, из-за недостаточной подачи балластного газа или из-за сродства откачиваемых паров и масла, когда пары растворяются в масле), остаточное давление насоса по откачиваемым парам $p_{п.ост} \neq 0$ и наблюдается уменьшение массовой производительности насоса по парам, что может быть учтено, если в формулы (11-4), (11-8) и (11-9) вместо $p_п$ подставить $p_п - p_{п.ост}$.

Механические вакуумные насосы с деформируемой камерой. Как уже отмечалось, существенным недостат-

ком механических вакуумных насосов с масляным уплотнением является проникновение паров масла и продуктов его крекинга в откачиваемый объем.

Для создания так называемого «чистого» вакуума были разработаны механические насосы с деформируемой рабочей камерой [31, 86].

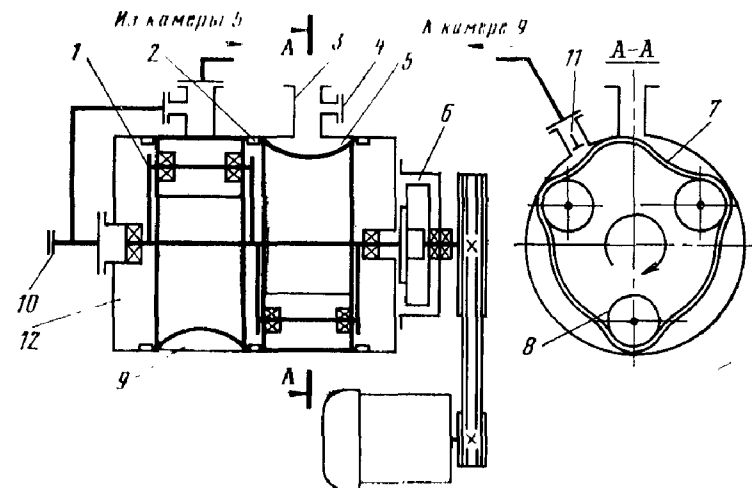


Рис. 11-5. Схема механического насоса с деформируемой камерой.

1 — турникет; 2 — прижимное кольцо; 3 — выпускное отверстие; 4 — патрубок для датчика давления; 5, 9 — рабочие камеры; 6 — привод; 7 — эластичная оболочка; 8 — ролик; 10 — патрубок для крана напуска атмосферы; 11 — выпускной клапан; 12 — собственный объем насоса.

На рис. 11-5 показана схема такого насоса, принцип действия которого основан на последовательном циклическом изменении объема эластичной оболочки 7 при ее деформации роликами 8. При вращении турникета 1 с тремя роликами 8 по часовой стрелке происходит всасывание газа и перенос его к выпускному клапану 11.

При работе насоса в эластичной оболочке периодически создается разрежение. С тем, чтобы исключить сжатие оболочки атмосферным давлением, в полости 12 насоса создается разрежение. Для этого в корпусе насоса эластичная оболочка закреплена двумя кольцами 2 таким образом, чтобы образовались две рабочие камеры 5 и 9, причем камера 5 предназначена для откачки объема, а камера 9 — для откачки внутренней полости 12 самого насоса. Камеры 5 и 9 соединены последовательно друг с другом. В каждой рабочей камере установлен свой турникет 1 с тремя роликами.

При аварийном прорыве атмосферы или при заклинивании выпускного клапана 11 эластичная оболочка 7 может чрезмерно раздуться, что приведет к быстрому выходу ее из строя. Поэтому нельзя начинать откачку объема, находящегося при атмосферном давлении, если в насосе уже достигнуто предельное давление или если насос работает только на откачку собственного объема.

Насосы этого типа не имеют газобалластного устройства. Поэтому при откачке конденсирующихся паров и газов в выпускном патрубке насоса скапливается конденсат, который не только увеличивает остаточное давление, но и нарушает работу насоса. Предельное давление насосов с деформируемой камерой составляет обычно 10^{-1} Па и определяется главным образом парами воды.

Существенным недостатком насоса является малый срок службы (500—1000 ч) из-за недостаточной прочности и износостойкости деформируемой оболочки, которая изготавливается обычно из полиуретана СКУ-7. Кроме того, трудно создать насосы с деформируемой оболочкой с достаточно большой быстротой действия из-за небольших скоростей вращения ротора и малых размеров гибкой оболочки.

Двухроторные вакуумные насосы. Основными достоинствами двухроторных насосов являются отсутствие трения в роторном механизме, простота устройства и возможность хорошей динамической балансировки роторов, в связи с чем достигаются большие скорости вращения и высокая быстрота действия насосов при сравнительно малых габаритах и массе.

Схема двухроторного насоса показана на рис. 11-6. В рабочей камере насоса расположены два ротора, напоминающие в сечении цифру 8, синхронно вращающиеся навстречу друг другу. Синхронность вращения обеспечивается с помощью закрепленных на валах роторов шестерен связи, вынесенных за пределы рабочей камеры. Во время работы роторы не касаются друг друга и стенок рабочей камеры, что достигается благодаря их точному профилированию и регулировке зазоров при сборке.

На рис. 11-7 показан ряд последовательных положений роторов при работе.

При вращении роторов газ, заключенный между корпусом и впадинами роторов (в положении рис. 11-7,а и д — нижнего, в положении рис. 11-7,в — верхнего ро-

тора), переносится от входного патрубка насоса к выходному (положения б и г — промежуточные). Геометрическая быстрота действия двухроторного насоса определяется объемом, удаляемым впадинами обоих роторов в единицу времени. Истинная быстрота действия насоса меньше геометрической из-за обратного перетекания га-

Рис. 11-6. Схема двухроторного вакуумного насоса.

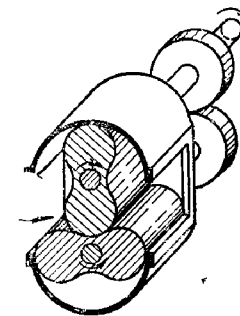
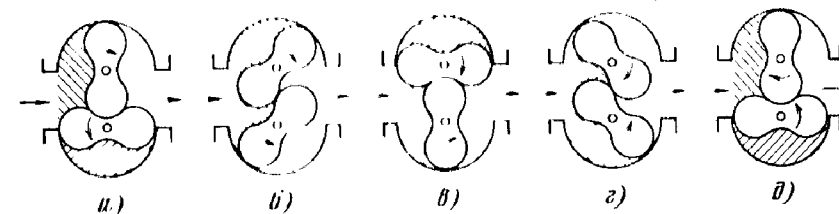


Рис. 11-7. Последовательные положения роторов при работе.



за с выхода на вход через зазоры в роторном механизме. Эти зазоры сравнительно велики (даже у самых маленьких насосов зазоры немногим меньше 0,1 мм), и если бы двухроторные насосы работали с выпуском в атмосферу, их остаточное давление составляло бы около 10^4 Па. Поэтому двухроторные насосы имеют на выпуске насос предварительного разрежения, иначе они не способны создать низкие давления. Быстрота действия двухроторного насоса тем больше, чем меньше отношение $p_{\text{вып}}/p_{\text{н}}$ (сжатие), т. е. чем больше быстрота действия форвакуумного насоса при неизменном потоке газа. При работе двухроторного насоса в области среднего вакуума имеет место молекулярный режим течения газов в зазорах роторного механизма, т. е. проводимость зазоров, обратно пропорциональная квадратному корню из молекулярной массы газа, больше для легких газов (водород, гелий) и меньше для тяжелых (аргон). Поэтому быстрота действия и наибольшее сжатие двухро-

торного насоса будут меньше для легких газов и больше для тяжелых при прочих равных условиях, т. е. эти насосы обладают так называемой селективностью откачивающего действия.

В двухроторном насосе газ передается со входа на выход порциями постоянного объема, т. е. объем камеры при этом не уменьшается.

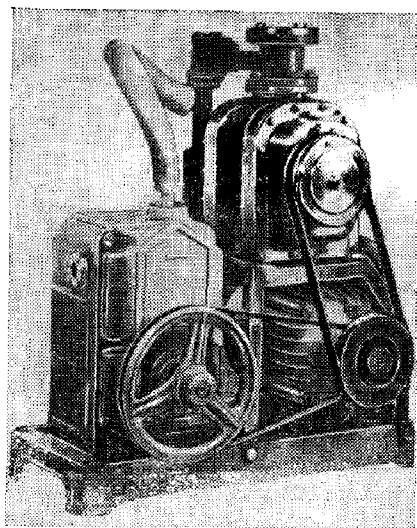


Рис. 11-8. Двухроторный вакуумный агрегат.

Сжатие передаваемого газа происходит практически мгновенно от давления p_{in} до давления $p_{вып}$ при сообщении полости, передающей газ, со стороной выпуска двухроторного насоса (рис. 11-7, верхняя полость), так как в нее устремляется газ со стороны выпуска. Поэтому индикаторная мощность двухроторного насоса значительно выше, чем она была бы у насоса с масляным уплотнением, работающего в таких же условиях. Однако этот недостаток при работе в области низких давлений 10^3 — 10^{-1} Па несуществен, так как сама индикаторная мощность очень мала. Потери мощности в приводе, подшипниках и шестернях связи также довольно невелики, а трение в роторном механизме отсутствует, поэтому у двухроторных насосов в области давлений меньше $6,5 \cdot 10^2$ Па потребление мощности на единицу быстроты действия (удельная мощность) значительно меньше, чем у насосов с масляным уплотнением.

Двухроторные вакуумные насосы часто объединяют в агрегаты с механическими вакуумными насосами, предназначенными для предварительного разрежения. В качестве примера на рис. 11-8 приведен агрегат, состоящий из последовательно соединенного малогабаритного двухроторного механического насоса с механическим вакуумным насосом. Привод обоих насосов осуществляется от одного электродвигателя.

При этом не уменьшается. Сжатие передаваемого газа происходит практически мгновенно от давления p_{in} до давления $p_{вып}$ при сообщении полости, передающей газ, со стороной выпуска двухроторного насоса (рис. 11-7, верхняя полость), так как в нее устремляется газ со стороны выпуска. Поэтому индикаторная мощность двухроторного насоса значительно выше, чем она была бы у насоса с масляным уплотнением, работающего в таких же условиях. Однако этот недостаток при работе в области низких давлений 10^3 —

Применение двухроторных вакуумных насосов особенно целесообразно в системах централизованного форвакуума при откачке объемов установок обезгаживания и сушки деталей, в которых наблюдаются значительные газовыделения. Двухроторные вакуумные насосы выгодно применять для откачки электровакуумных приборов, не требующих разрежения лучше $5 \cdot 10^{-2}$ Па.

Состав остаточных газов двухроторных насосов качественно такой же, как и у насосов с масляным уплотнением, т. е., несмотря на отсутствие смазки в роторном механизме, двухроторные насосы не обеспечивают безмасляного вакуума, так как из-за малых величин наибольшего сжатия (не более 100) пары масла поступают на их вход со стороны форвакуума и из камеры шестерен связи и их подшипников.

11-3. ЭЖЕКТОРНЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия эжекторных насосов состоит в следующем.

Рабочее тело (газ или пар), имеющее повышенное давление, поступает в сопло 1 (рис. 11-9), где потенциальная энергия давления струи преобразуется в кинетическую. Струя пара или газа, получившая высокую скорость и имеющая низкое статическое давление, по выходе из сопла попадает в камеру смешения 2.

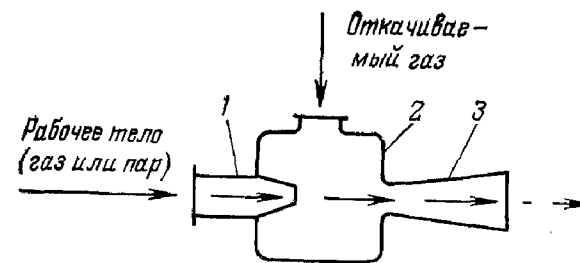


Рис. 11-9. Эжекторное сопло.

В камере смешения откачиваемый газ увлекается рабочим телом и интенсивно смешивается с ним. Эта смесь, обладающая несколько меньшей, но все еще значительной скоростью, попадает в диффузор 3, в котором сжимается за счет перехода кинетической энергии струи в потенциальную энергию давления.

На место удаляющейся из камеры смешения смеси поступают все новые порции газа, которые в свою очередь также смешиваются с рабочим телом.

На выходе из диффузора давление смеси тем не менее будет меньше давления рабочего тела на входе в сопло, но значительно выше давления откачиваемого газа в камере смешения.

Эжекторные насосы работают в области давлений от атмосферного до 1 Па и могут применяться в вакуумных системах в качестве самостоятельных насосов или насосов предварительного разрежения.

Водоструйные насосы. Водоструйные насосы предназначены для откачки воздуха и других газов от атмосферного давления до 100 Па.

На рис. 11-10 показана одна из конструкций водоструйного насоса. Работа насоса основана на использовании откачивающего действия струи воды, которая под давлением $2,5 \cdot 10^5$ Па истекает из сопла 1. Откачиваемый

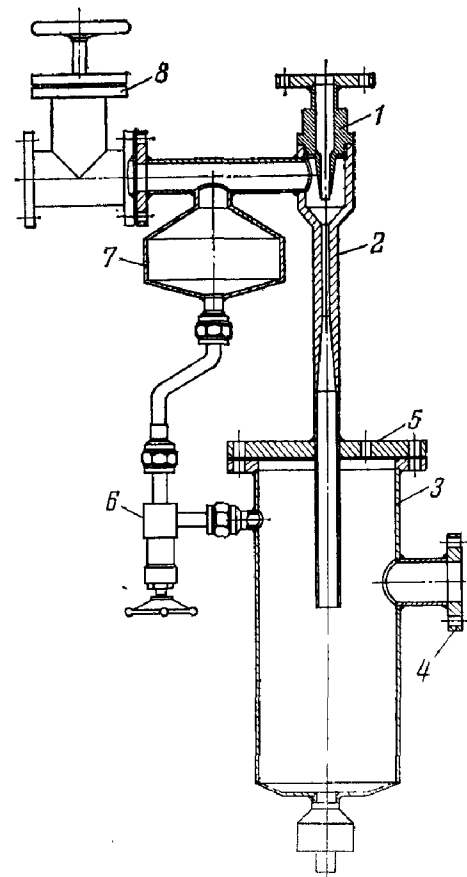


Рис. 11-10. Водоструйный насос.

газ в сфере действия струи перемешивается с нею, и смесь воды с газом попадает затем в цилиндрическую камеру 2, за которой установлен расширяющийся диффузор. В диффузоре статическое давление смеси воды и газа повышается за счет уменьшения скорости и доводится до атмосферного давления. Смесь воды с газом стекает в бачок 3, откуда сливается в дренажную линию, присоединенную к патрубку 4. Для выхода газа из бачка

во фланце 5 предусмотрено отверстие. Насос присоединяется к вакуумной системе через кран 8. Резервуар 7 предназначен для приема воды, засасываемой через диффузор из бачка в случае аварийного прекращения ее подачи. Через кран 6 подается воздух в резервуар при

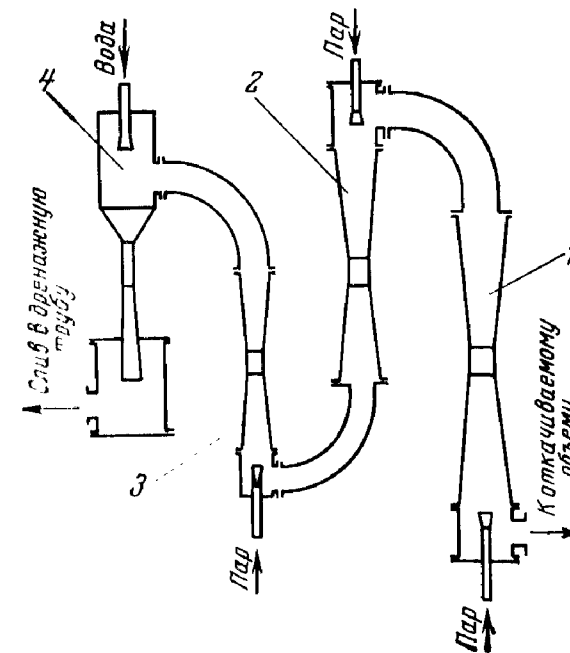


Рис. 11-11. Принципиальная схема многоступенчатого парожеторного насоса.

1 — первая пароструйная ступень; 2 — вторая пароструйная ступень; 3 — третья пароструйная ступень; 4 — водоструйная ступень.

остановке насоса, что также предотвращает всасывание воды.

Производительность насоса возрастает с повышением давления воды. Предельное давление насоса практически равно упругости пара воды и увеличивается с повышением ее температуры.

Водоструйные насосы часто применяются в системах безмасляной откачки. Так, водоструйный насос может быть использован в качестве насоса предварительного разрежения для высоковакуумного пароструйного ртутного насоса, для сорбционного насоса, а также в качестве последней ступени в парожеторном насосе.

Пароэжекторные насосы. Принципиальная схема современного многоступенчатого пароэжекторного насоса изображена на рис. 11-11.

Пар под давлением $4 \cdot 10^5$ Па попадает в распределительный бачок и через краны подводится к соплам пароструйных ступеней 1, 2 и 3. Вода также под давлением $4 \cdot 10^5$ Па поступает к водоструйной ступени 4. Пройдя через сопло водоструйной ступени, вода попадает в расширительный бак, где гасится скорость водяного потока. Из бака вода сливается без напора в дренажную трубу. Как правило, в многоступенчатых эжекторах за каждой ступенью устанавливаются конденсаторы, в которых пар конденсируется, а газ откачивается последующей ступенью. При этом давление за ступенью практически равно давлению насыщенного пара и при температуре воды, охлаждающей конденсатор, примерно 300 К составляет $(2-3) \cdot 10^3$ Па. Предельное давление в таком насосе обычно равно $(10-13) \cdot 10^2$ Па.

Выгодным отличием насоса, построенного по схеме рис. 11-11, является исключение промежуточных конденсаторов. Но вследствие этого каждая последующая ступень откачивает не только газ, но и весь рабочий пар, поступающий из предыдущей ступени.

Предельное давление подобного насоса составляет примерно 10^{-1} Па; но для достижения такого низкого давления необходимый расход воды и пара оказывается большим.

11-4. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ НАСОСЫ

Пароструйные насосы. Принципиальная схема пароструйного насоса, работа которого основана на откачивающем действии паровой струи, показана на рис. 11-12.

Источником пара является рабочая жидкость (ртуть или вакуумное масло), залитая в кипятыльник 2, которая нагревается до рабочей температуры нагревателем 1; образующийся пар по пароподводящей трубе 3 поступает в сопло 5, из которого с большой скоростью истекает в пространство рабочей камеры 6. Откачиваемый газ, поступающий через впускной патрубок 9, захватывается в рабочей камере струей и увлекается ею к охлажденным стенкам рабочей камеры, где пар конденсируется и конденсат по сливной трубке 8 возвращается в кипятыльник, а газ, сжатый струей, выбрасывается через выпуск-

ной патрубок 10 и откачивается форвакуумным насосом.

Механизм увлечения газа паровой струей поясняется рис. 11-13.

При определенной плотности струи пара рабочей жидкости, истекающего из сопла насоса, и давлении откачиваемого газа до $10 \cdot 10^{-1}$ Па увлечение газа струей

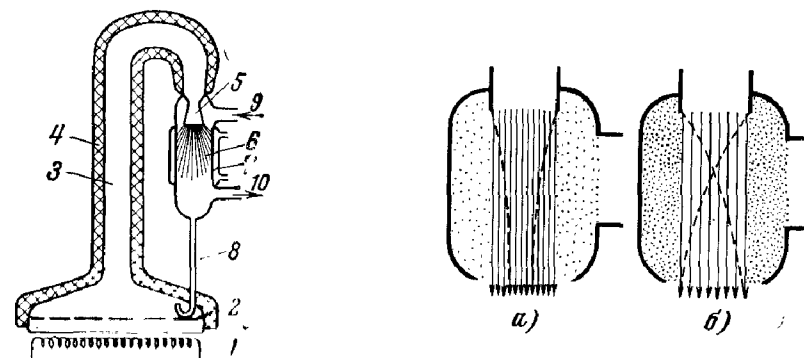


Рис. 11-12. Принципиальная схема пароструйного вакуумного насоса. 1 — нагреватель; 2 — кипятыльник; 3 — паропроводящая труба; 4 — теплоизоляция; 5 — сопло; 6 — рабочая камера насоса; 7 — холодильник; 8 — трубка для стока конденсата и кипятыльник; 9 — вход откачиваемого газа; 10 — выход газа

Рис. 11-13. Способы увлечения газа паровой струей.

а — диффузия газа в достаточно плотную струю пара наряду с вязкостным захватом газа в бустерных насосах при давлениях газа $10-10^{-1}$ Па; б — диффузия молекул газа в струю малой плотности в диффузионных насосах при давлении газа примерно 10^{-2} Па.

пара будет происходить в основном за счет *вязкостного захвата* и частично за счет *диффузии* газа в струю (рис. 11-13,а).

Подобный механизм увлечения откачиваемого газа паровой струей используется в *бустерных* насосах.

Бустерные (вспомогательные) насосы обладают наибольшей быстротой действия в диапазоне давлений $10-10^{-1}$ Па и применяются совместно с механическими вакуумными насосами с масляным уплотнением, быстрота действия которых в этом диапазоне давлений практически близка к нулю. В насосах этого типа обеспечивается повышенная плотность струи масляного пара за счет применения легколетучих сортов вакуумного масла, увеличения мощности подогревателей и использования обращенных сопл зонтичного типа (рис.

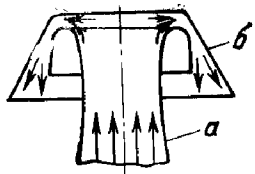


Рис. 11-14. Схема обращенного сопла зонтичного типа.

а — подсопельник; б — зонтик сопла.

В качестве рабочей жидкости во вспомогательных бустерных насосах используются нефтяные масла марок Г и ВМ-3 (см. § 13-4). При этом выпускное давление насосов обычно лежит в пределах 40—200 Па. Дальнейшее увеличение выпускного давле-

11-14). Последняя ступень бустерных насосов часто выполняется в виде эжекторного сопла с диффузором, с тем чтобы обеспечить высокое выпускное давление. Бустерный насос простейшей конструкции представлен на рис. 11-15.

В качестве рабочей жидкости во вспомогательных бустерных насосах используются нефтяные масла марок Г и ВМ-3 (см. § 13-4). При этом выпускное давление насосов обычно лежит в пределах 40—200 Па. Дальнейшее увеличение выпускного давле-

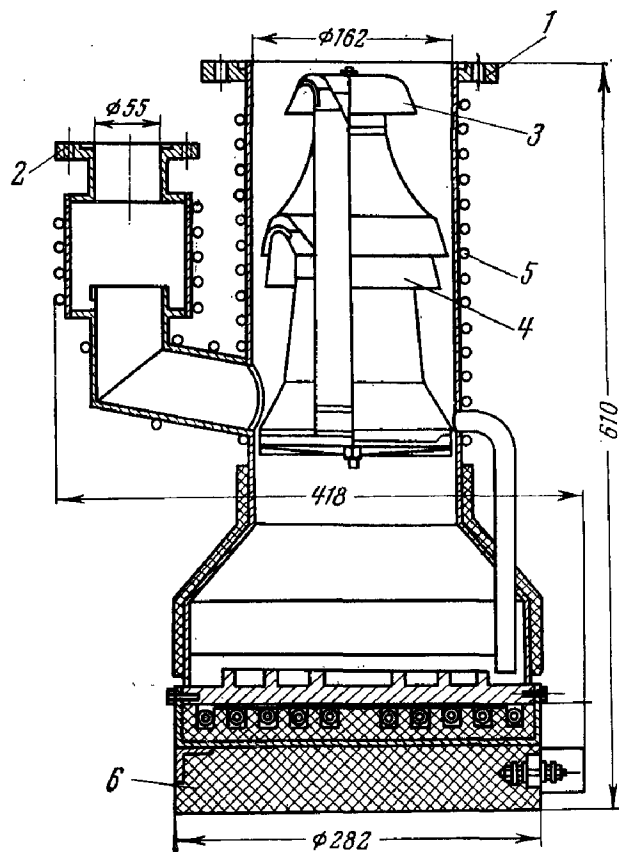


Рис. 11-15. Бустерный насос.

1 — входной патрубок; 2 — выпускной патрубок; 3 — верхнее сопло; 4 — нижнее сопло; 5 — змеевик охлаждения; б — нагреватель.

ния приводит к окислению рабочей жидкости. При применении полифенилметилсилоксанового продукта марки ПФМС-1, имеющего повышенную термоокислительную стойкость, и увеличении мощности подогрева выпускное давление может быть доведено до 400—500 Па. Зависимость быстроты действия отечественных бустерных насосов от впускного давления показана на рис. 11-16.

Принцип работы диффузионных пароструйных насосов состоит в том, что за счет разности парциальных давлений откачиваемого газа в струе пара рабочей жидкости, вытекающей из сопла насоса, и

в объеме происходит диффузия откачиваемого газа в струю. Механизм увлечения газа струей пара поясняется рис. 11-13,б. При давлении откачиваемого газа 10^{-2} Па и ниже длина свободного пути его молекул становится соизмеримой с размерами рабочей камеры насоса. При этом вязкостное взаимодействие практически исчезает, и механизм увлечения газа целиком определяется диффузией молекул газа в струю, где молекулы в результате столкновений с частицами пара получают дополнительную скорость в направлении течения струи.

Конструкция паромасляных диффузионных насосов имеет ряд особенностей, связанных с использованием в качестве рабочей жидкости масла (см. § 13-4). Это прежде всего устройства, обеспечивающие фракционирование (т. е. разделение на фракции) неоднородных масел, причем тяжелые фракции (с низким давлением насыщенного пара) направляются в сопло первой (высоковакуумной) ступени, чем обеспечивается низкое остаточное давление и высокое быстродействие насоса в це-

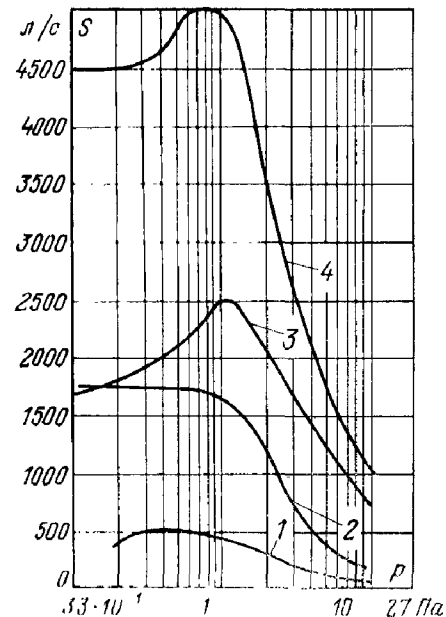


Рис. 11-16. Зависимости быстроты действия бустерных насосов от впускного давления.

1 — БН-3; 2 — БН-1500; 3 — БН-2000; 4 — БН-4500.

лом, а легкие фракции (с высоким давлением насыщенного пара) направляются в сопло последней ступени, обеспечивая высокое выпускное давление. Насосы с таким устройством называются *фракционирующими* или *разгоночными*. На рис. 11-17,а показано устройство металлического высоковакуумного разгоночного диффузионного насоса Н-5, входящего в ряд диффузионных на-

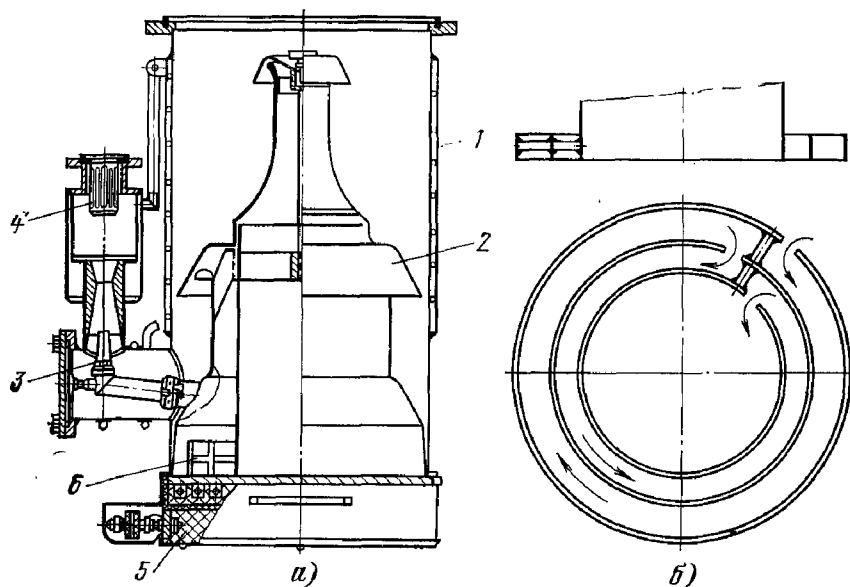


Рис. 11-17. Паромастный диффузионный насос (а) и действие лабиринтных колец для фракционирования масла (б).

сосов единой серии (рис. 11-19). Сварной корпус 1 насоса выполнен из малоуглеродистой стали с наваренной на него рубашкой водяного охлаждения. Паропровод 2 с двумя зонтичными соплами изготовлен из алюминия; последней выходной ступенью является эжектор 3 с ловушкой для паров масла 4.

Фракционирование масла, стекающего в кипятыльник с периферии по стенке корпуса, осуществляется с помощью лабиринтных колец б, удлиняющих путь масла (рис. 11-17,б) до поступления в центральную зону кипятыльника, откуда питается паром высоковакуумное сопло, так что легкие фракции масла успевают испаряться на периферии кипятыльника, откуда они поступают во второе зонтичное и эжекторные сопла насоса. Однако лабиринтные кольца не прилегают плотно к днущу ки-

пятыльника, в связи с чем не обеспечивается достаточно полное фракционирование масла.

Улучшение фракционирования масла может быть достигнуто за счет изготовления лабиринтных каналов в днище кипятыльника. При этом паропроводящие трубы сопел плотно надеваются на перегородки соответствующих каналов и исключают смешивание фракций.

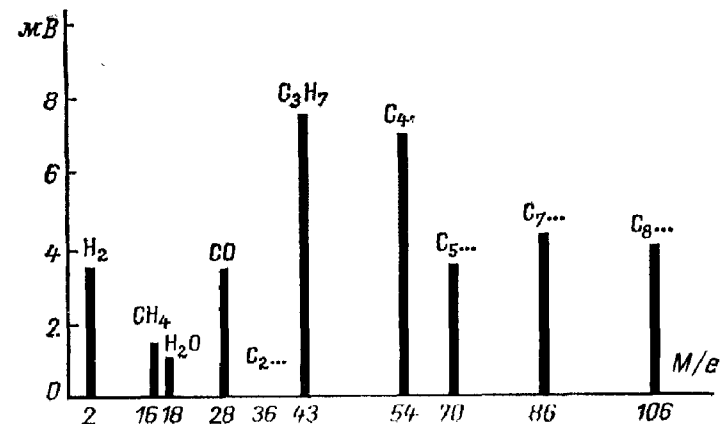


Рис. 11-18. Спектр остаточных газов в паромастном диффузионном насосе.

Для сокращения времени достижения предельного давления масло перед заливкой в новый насос рекомендуется обезвоживать. Процесс обезвоживания, т. е. удаление паров воды из масла, состоит в прогреве масла до

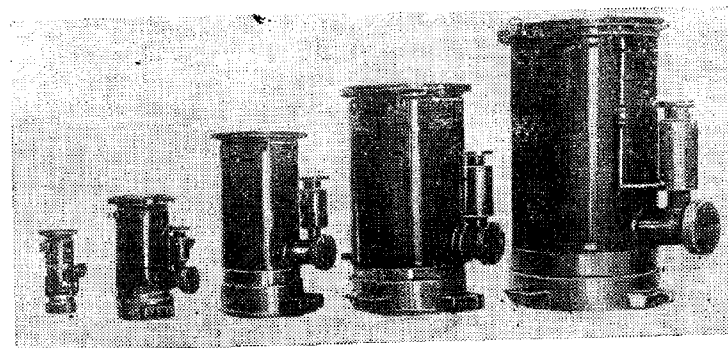


Рис. 11-19. Высоковакуумные паромастные диффузионные насосы (слева направо): Н-1С, Н-5С (не имеют эжекторной ступени), Н-2, Н-5, Н-8.

температуры 390—400 К с одновременной откачкой до давления примерно 1 Па [46].

Состав остаточных газов в диффузионном паромасляном насосе, длительное время находившемся в работе, в основном определяется продуктами разложения рабочей жидкости в кипятыльнике насоса. В качестве примера на рис. 11-18 приведен типичный спектр остаточных газов в паромасляном диффузионном насосе, работающем на минеральном масле ВМ-5 [79].

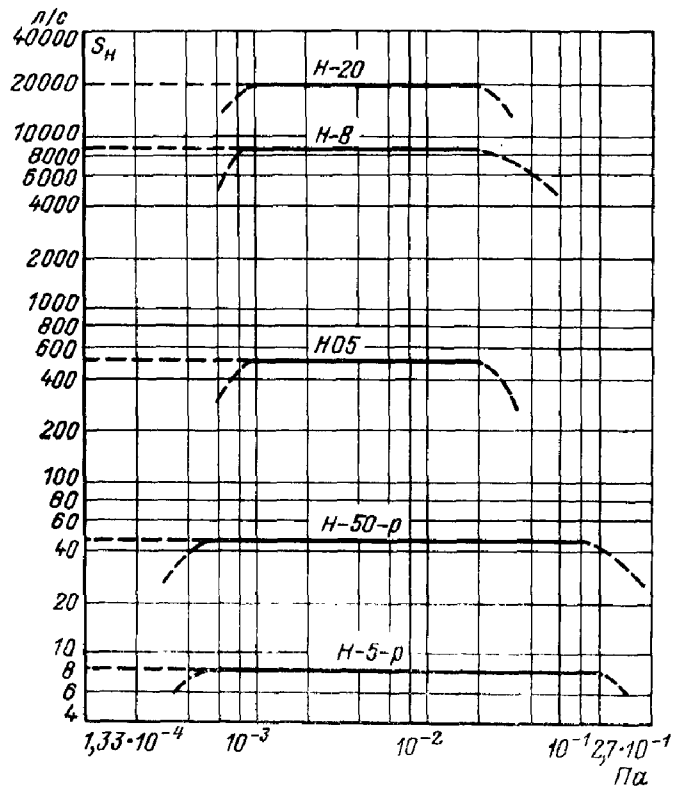


Рис. 11-20. Быстрота действия паромасляных и парортутных насосов в зависимости от впускного давления.

Основные характеристики пароструйных насосов существенно зависят от молекулярной массы откачиваемого газа, что связано с большой противодиффузией легких газов (водород, гелий) через паровую струю по сравнению с тяжелыми газами (аргон, азот, кислород).

Так, например, увеличение выпускного давления азота в довольно широких пределах не влияет на предель-

ное остаточное давление; только при превышении наибольшего для данного насоса выпускного давления $p_{\text{выб}}$ происходит резкое повышение давления во входном сечении и насос прекращает работу. Увеличение же выпускного давления водорода сразу сказывается на предельном остаточном давлении насоса.

Быстроту действия насоса можно значительно увеличить за счет придания конусности верхней части корпуса

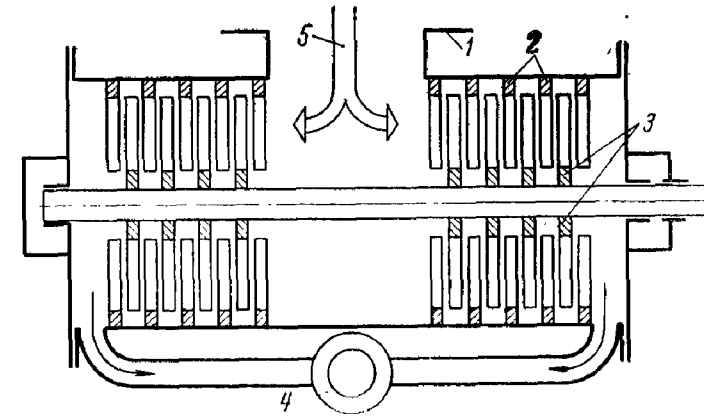


Рис. 11-21. Схема турбомолекулярного насоса.

1 — корпус; 2 — статорные диски; 3 — роторные диски; 4 — выпускной патрубок; 5 — впускной патрубок.

насоса [20, 21]. Быстрота действия диффузионных насосов резко уменьшается как в области высоких давлений, так и в области остаточного давления (рис. 11-20).

Уменьшение быстроты действия диффузионного насоса в области высоких давлений объясняется возрастанием выпускного давления (из-за ограниченности быстроты действия форвакуумного насоса) и нарушением работы паровой струи. Уменьшение быстроты действия в области предельного остаточного давления связано с возрастающим влиянием постоянного газовыделения насоса (занос газов и легких фракций рабочей жидкости в верхнее сопло, противодиффузия газов через струю, газовыделение со стенок).

Турбомолекулярные насосы. Принцип действия турбомолекулярного насоса основан на сообщении молекулам разреженного газа направленной дополнительной скорости быстро движущейся твердой поверхностью.

Схема турбомолекулярного насоса показана на рис. 11-21. Рабочий механизм насоса образован роторными 3

и статорными дисками 2, имеющими радиальные косые пазы — каналы, боковые стенки которых наклонены относительно плоскости колеса под углом $40\text{--}15^\circ$, причем пазы статорных дисков расположены зеркально относительно пазов роторных дисков (рис. 11-22). Между статорными дисками и валом ротора и между роторными дисками и корпусом насоса имеются зазоры.

При молекулярном режиме течения газа в насосе,

т. е. при давлениях ниже $1\text{--}10^{-1}$ Па, такая система подвижных и неподвижных пазов обеспечивает преимущественное прохождение молекул газа в направлении откачки (слева направо на рис. 11-22). Действительно, молекула газа, прошедшая через статорный паз (или отразившаяся от статорного диска) и движущаяся к роторному диску слева, попав в паз роторного диска, имеет большую вероятность пройти через него, так как боковая стенка 1 роторного паза уходит с пути молекулы, а стенка 2 не может ее нагнать, в то время как такая же молекула, подходящая к роторному диску справа, т. е. против направления откачки, вошедшая в паз, будет с большой вероятностью задержана стенкой 2 роторного паза и отражена обратно в направлении откачки. Молекулы, отраженные роторным диском, в дополнение к тепловой скорости приобретают дополнительную скорость. Эта скорость по порядку величины сравнима с окружной скоростью роторного диска и направлена параллельно оси насоса (на рис. 11-22 вправо). Благодаря соответствующему углу наклона боковых стенок статорного паза здесь также обеспечивается преимущественное прохождение молекул в направлении откачки. Таким образом, каждая ступень, состоящая из роторного и статорного дисков, создает перепад давлений $(p_2/p_1)_{\text{макс}}$, равный приблизительно отношению Σ_{12}/Σ_{21} вероятностей перехода молекул через паз в направлении откачки

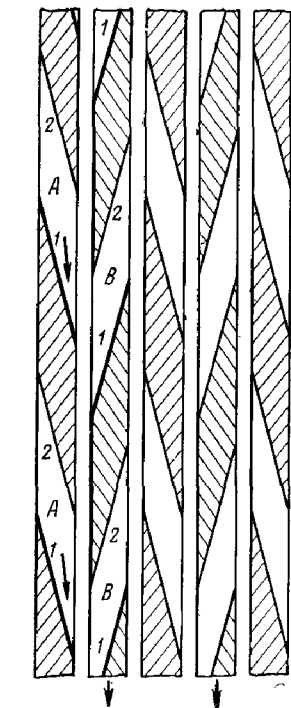


Рис. 11-22. Роторные и статорные диски с пазами.

ной скоростью роторного диска и направлена параллельно оси насоса (на рис. 11-22 вправо). Благодаря соответствующему углу наклона боковых стенок статорного паза здесь также обеспечивается преимущественное прохождение молекул в направлении откачки. Таким образом, каждая ступень, состоящая из роторного и статорного дисков, создает перепад давлений $(p_2/p_1)_{\text{макс}}$, равный приблизительно отношению Σ_{12}/Σ_{21} вероятностей перехода молекул через паз в направлении откачки

(Σ_{12}) и обратном направлении (Σ_{21}), а наибольшая возможная быстрота действия ступени (при $p_1=p_2$) пропорциональна разности ($\Sigma_{12}-\Sigma_{21}$). В области достигнутых ныне окружных скоростей турбомолекулярных насосов $v_{\text{окр}}/u_B \leq 1$ разность ($\Sigma_{12}-\Sigma_{21}$) приблизительно линейно зависит от $v_{\text{окр}}/u_B$, т. е. эффективность насоса возрастает с ростом окружной скорости ротора.

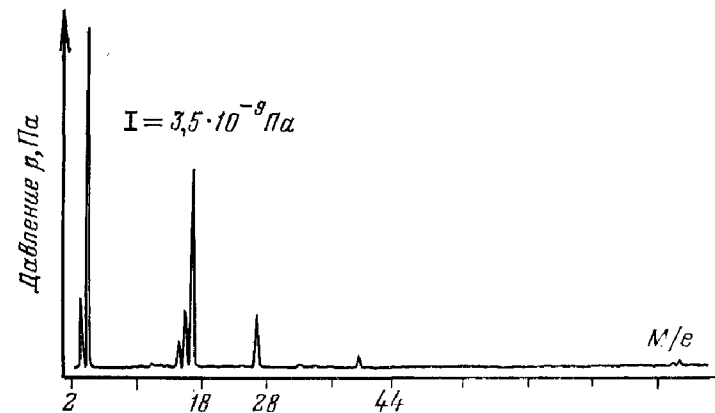


Рис. 11-23. Спектр остаточных газов в турбомолекулярном насосе.

Расчеты показывают, что максимальная быстрота действия насоса достигается при угле наклона пазов роторного диска около 30° . С другой стороны для получения достаточно высокой степени сжатия ступени (от 3 до 5) угол наклона паза должен быть не более 20° . Поэтому в современных турбомолекулярных насосах высоковакуумные ступени выполняются с углом наклона паза 35° , а все остальные — 20° .

Для быстрых молекул (легкие газы) окружная скорость ротора является относительно меньшей, чем для медленных молекул (тяжелые газы), поэтому коэффициент сжатия ступени заметно меньше для легких газов.

Каждый роторный и статорный диск создает небольшой перепад давления; однако благодаря большому количеству последовательных ступеней (30—40) обеспечивается высокий коэффициент сжатия насоса в целом ($10^2\text{--}10^3$ по водороду, $10^7\text{--}10^9$ по азоту).

Так как турбомолекулярные насосы имеют очень высокие коэффициенты сжатия для тяжелых газов, то во

время работы эти насосы являются надежным барьером против проникновения тяжелых молекул масла, имеющих в форвакуумной полости. На рис. 11-23 показан состав остаточных газов турбомолекулярного насоса, откуда видно, что основным остаточным газом является водород ($M/e=2$). Кроме того, содержится небольшое количество паров воды ($M/e=18$ и 17), смесь окиси угле-

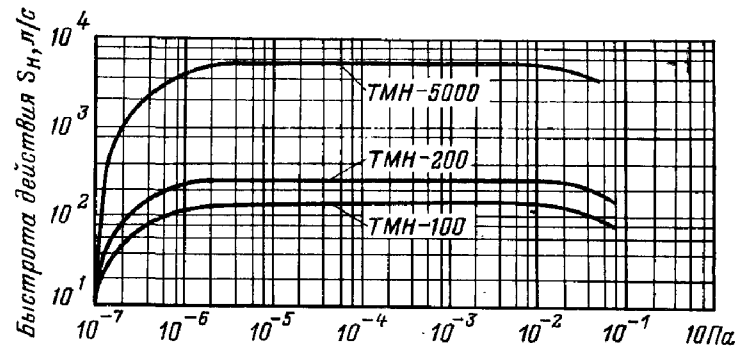


Рис. 11-24. Быстрота действия турбомолекулярных насосов в зависимости от впускного давления.

рода и азота ($M/e=28$) и двуокиси углерода ($M/e=44$). Таким образом, как видно из рис. 11-23, в остаточных газах тяжелые углеводородные соединения не обнаруживаются и турбомолекулярные насосы с достаточным основанием считаются безмасляным средством откачки, хотя в их форвакуумных полостях присутствуют пары масла, используемого для смазки подшипников насоса, и пары масла, попадающие туда из механического вакуумного насоса.

На рис. 11-24 показаны зависимости быстроты действия нескольких типов отечественных турбомолекулярных насосов от впускного давления. Быстрота действия остается постоянной в широком диапазоне давлений — от 10^{-1} Па, когда начинает сказываться изменение режима течения газа через лопатки насоса. Предельное остаточное давление турбомолекулярного насоса определяется выделением водорода из корпуса, статора и ротора, а также перетеканием водорода из форвакуумной полости насоса.

Достоинства турбомолекулярных насосов — быстрый запуск, малая селективность при откачке различных га-

зов, отсутствие паров масла в остаточной атмосфере, получение сверхвысокого вакуума без использования ловушек на входе. Механизм насоса не повреждается при всплесках давления и прорывах атмосферного воздуха. Все это обусловило их широкое применение во многих отраслях науки и промышленности.

11-5. СОРБЦИОННЫЕ НАСОСЫ

Адсорбционные насосы. Принцип действия адсорбционных насосов основан на способности предварительно обезгаженных твердых пористых тел поглощать газы и пары в основном за счет физической адсорбции.

Адсорбционные насосы нашли применение в системах безмасляной откачки как для создания предварительно разрежения, так и для получения или поддержания весьма низких давлений в высоковакуумных камерах. В качестве поглощающих материалов (адсорбентов) могут применяться силикагели, алюмогели, цеолиты и активированные угли.

Таблица 11-2

Характеристики некоторых цеолитов

Марка цеолита	Средний диаметр пор, нм	Объем пор, м ³ /кг	Адсорбционный объем гранулированного цеолита, м ³ /кг	Максимальная адсорбция азота, м ³ ·Па/кг
КА	0,3	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^4$
NaA	0,4			
CaA	0,5		$2 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^4$
CaX	0,7	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^4$
NaX	0,8—0,9	$3,2 \cdot 10^{-4}$		

Однако наибольшее распространение в качестве адсорбента получили цеолиты, представляющие собой алюмосиликаты щелочного или щелочноземельного металла природного или искусственного происхождения. Характеристики структуры цеолитов приведены в табл. 11-2 [9]. Пористую структуру и очень хорошие адсорбирующие свойства они приобретают после прокаливания; при

Этом кристаллическая решетка не разрушается, и после удаления кристаллизационной воды в цеолитах получаются очень равномерные по размерам тонкие поры. В поры могут проникнуть только те газы, диаметр молекул которых меньше размера пор, т. е. цеолиты обладают избирательным поглощением газов, и это дало повод называть их «молекулярными ситами».

Например, цеолит марки СаА обладает порами с диаметром 0,5 нм, цеолит марки NaX — 0,9 нм. Напомним, что диаметры молекул основных атмосферных газов O₂, N₂, CO₂ близки к 0,3 нм. Многочисленные поры образуют большую удельную поверхность. Так, у цеолита СаА поры имеют удельную поверхность, достигающую 600 м²/г.

С увеличением количества поглощенного газа при неизменной температуре адсорбента возрастает равновесное давление откачиваемого газа. Вместе с тем при одном и том же количестве поглощенного газа равновесное давление над поверхностью адсорбента тем меньше, чем ниже его температура. Поэтому в вакуумных адсорбционных насосах адсорбент обычно охлаждается жидким азотом и, реже, жидкими водородом или гелием.

Устройство адсорбционного насоса показано на рис. 11-25. В цилиндрический корпус 3, изготовленный из нержавеющей стали, вставлена перфорированная трубка 2. Кольцевое пространство между трубкой и корпусом заполнено цеолитом 1. Для охлаждения адсорбента на насос снизу одевается сосуд Дьюара, в который заливают жидкий азот. После окончания откачки кран на входе

насоса закрывается, сосуд Дьюара снимают, и насос отогревается до комнатной температуры. При этом вслед-

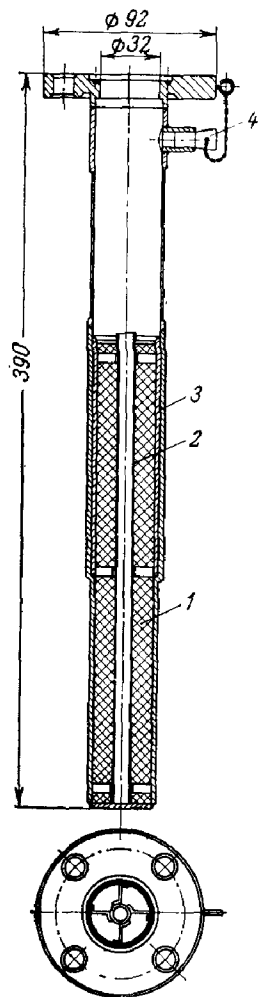


Рис. 11-25. Адсорбционный насос.

ствие обратного выделения газа из цеолита давление в объеме насоса может превысить атмосферное. В связи с этим в верхней части насоса предусмотрен клапан (пробка) 4, предохраняющий насос от разрушения при выделении газа из адсорбента. Такого отогрева с выпуском выделяющихся газов в атмосферу достаточно, чтобы насос был готов к следующему циклу откачки.

Предельное остаточное давление цеолитового насоса определяется адсорбционной емкостью адсорбента и зависит от количества ранее поглощенного насосом газа (табл. 11-3).

Таблица 11-3

Сорбционная емкость цеолита СаА

Равновесное давление, Па	Сорбционная емкость, м ³ /кг			
	Азот	Кислород	Аргон	Водород
6,6 · 10 ⁻³	—	1	6 · 10 ⁻²	1,4 · 10 ⁻²
1,33 · 10 ⁻²	4	1,5	1,3 · 10 ⁻¹	3 · 10 ⁻²
6,5 · 10 ⁻²	15	4,2	9 · 10 ⁻¹	5 · 10 ⁻²
1,33 · 10 ⁻¹	37	8	3	6 · 10 ⁻²
1,33	10 ²	80	30	3,2 · 10 ⁻¹

С целью получения низких предельных остаточных давлений рекомендуется предварительная откачка объема до давления 10⁴ Па водоструйным или механическим насосом. Иногда в качестве насоса предварительного разрежения используют также другой адсорбционный насос.

Испарительные геттерные насосы. Испарительные геттерные насосы относятся к сорбционным насосам, в которых поглощение газов осуществляется за счет физической адсорбции, хемосорбции, химических реакций и растворения в пленке металлического геттера, наносимого методом термического испарения. В качестве геттера в таких насосах может быть, вообще говоря, использован любой активный металл, применяемый для распыляемых геттеров электровакуумных приборов; однако из условий эксплуатационного удобства в промышленных насосах применяется пока только титан, хотя и известны лабораторные испарительные насосы, работающие на более активном барии [46]. Титан образует прочные нелетучие соединения или твердые растворы почти со всеми газами, имеющимися в вакуумных системах, за исключением инертных газов и углеводородов. Отличие в механиз-

ме поглощения различных газов приводит к тому, что быстрота действия испарительных геттерных насосов по разным газам неодинакова.

Быстрота действия насоса может быть определена по формуле

$$S_n = 36,4 \sqrt{\frac{T}{M}} \alpha A \left(1 - \frac{p_{\text{ост}}}{p_n}\right), \text{ м}^3/\text{с}, \quad (11-10)$$

где $\alpha \leq 1$ — коэффициент прилипания (см. гл. 3); $p_{\text{ост}}$ — остаточное давление насоса; p_n — давление во входном сечении насоса; T — температура газа, К; M — молекулярная масса газа; A — площадь входного сечения, м².

Вообще говоря, равновесное давление газа над пленкой геттера зависит от ее температуры, свойств образующихся соединений, от степени насыщения пленки газом и т. п. В насосах постоянно обновляемая пленка геттера непрерывно поддерживается в активном состоянии, поэтому предельное остаточное давление насоса определяется газовыделением из распыляемого геттера и элементов конструкции насоса. Коэффициент α зависит от скорости возобновления пленки геттера и его температуры. Чем больше площадь, на которую наносится пленка геттера, и ниже его температура, тем эффективнее работает насос.

Отметим, что на поверхности титановой пленки при комнатной температуре происходит реакция синтеза CH_4 , образующегося из присутствующих в системе углерода и водорода.

При охлаждении титановой пленки до температуры кипения жидкого азота скорость реакции синтеза метана резко уменьшается, а быстрота действия насоса по активным газам увеличивается из-за увеличения их коэффициента прилипания.

Коэффициенты прилипания для чистых пленок титана, не сорбировавших газ, при комнатной температуре составляют 0,4—0,5 для N_2 ; 0,6—0,7 для O_2 , CO и примерно 0,05 для H_2 ; при охлаждении пленки жидким азотом начальный коэффициент прилипания увеличивается до 0,9—1 для N_2 , O_2 , CO и до 0,4—0,5 для H_2 .

На рис. 11-26 показана схема сверхвысоковакуумного агрегата АВТО-20М, состоящего из геттерного насоса 1, азотной ловушки 4 и паромасляного насоса 5.

В геттерном насосе титан конденсируется на внутренней стенке цилиндрического экрана 6, охлаждаемой жидким азотом, подаваемым из сосуда Дьюара 2. Испаритель титана 3

содержит запас титановой проволоки и механизм для ее периодической подачи в водоохлаждаемый медный тигель — анод. Испарение титана происходит за счет разогрева титановой проволоки электронной бомбардировкой от имеющейся в испарителе электрон-

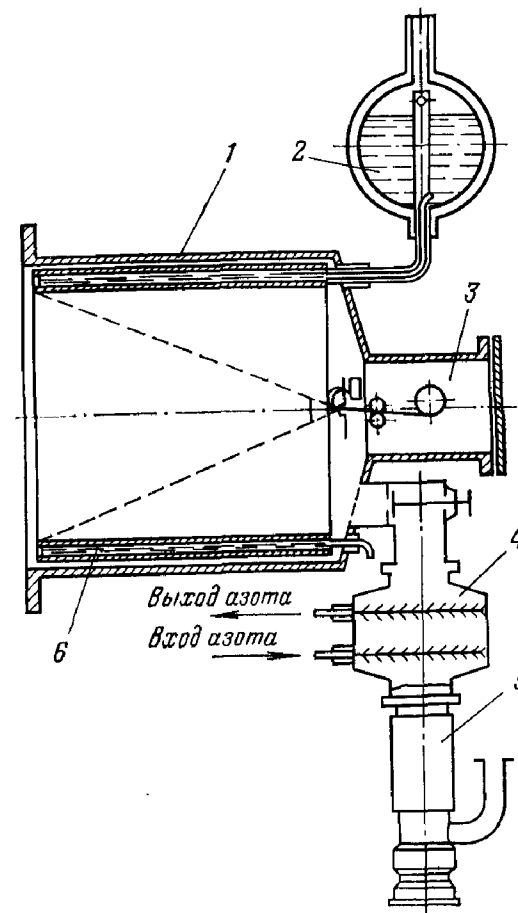


Рис. 11-26 Схема геттерного агрегата АВТО-20М.

ной пушки. Такой способ нагрева обеспечивает значительную скорость испарения титана при минимальном тепловом излучении, что определяет сравнительно небольшой расход азота (примерно 5 л/ч). Небольшой экран, установленный над испарителем, практически исключает попадание титана в откачиваемый объем.

Предельное остаточное давление агрегата АВТО-20М составляет 10^{-10} Па, быстрота действия по водороду — 28 000 л/с, по азоту — 10 000 л/с в диапазоне давлений 10^{-4} — 10^{-8} Па. Такая разница в быстроте действия по этим газам объясняется более высокой проводимостью входного патрубка насоса по водороду, чем по азоту.

В некоторых вакуумных установках (для исследования термоядерных реакций, имитации космических условий и т. п.) титан конденсируется на охлаждаемые жидким азотом экраны, установленные непосредственно внутри рабочей камеры, причем рабочая зона камеры экранирована от попадания паров титана. Такое устройство получило название *азотит*. При этом достигаются высокая быстрота действия (до сотен тысяч л/с) и предельное остаточное давление до 10^{-10} — 10^{-11} Па.

Геттерные электродуговые насосы. Испарение геттера в электродуговых насосах происходит с поверхности титанового катода за счет высокой концентрации энергии в катодном пятне электрической дуги постоянного тока. Плотность тока в катодном пятне достигает 10^{10} — 10^{11} А/м².

Катодное пятно хаотически перемещается по поверхности титана, благодаря чему обеспечивается равномерное испарение материала катода. Механизм этого процесса состоит в следующем.

Как показали исследования [26], катодное пятно на металлах состоит из отдельных ячеек. При стационарном состоянии дуги систематически происходит перераспределение тока между отдельными ячейками, в результате чего идет процесс распада отдельных ячеек и формирования новых, так как для существования ячейки необходимо обеспечить определенную плотность тока. При этом достигаются в общем стабильность тока дугового разряда и постоянное перемещение катодного пятна в случайных направлениях в результате взаимодействия магнитных полей отдельных ячеек, отталкивающих друг от друга.

Следует подчеркнуть, что благодаря тому, что дуга горит в парах испаряющегося металла, создаются условия для ее стабильного горения при весьма низком давлении остаточных газов. На рис. 11-27 приведена одна из конструкций геттерного электродугового насоса.

В корпусе 1, являющемся анодом системы, размещены катод 2 и поджигающее устройство 3, собранные на

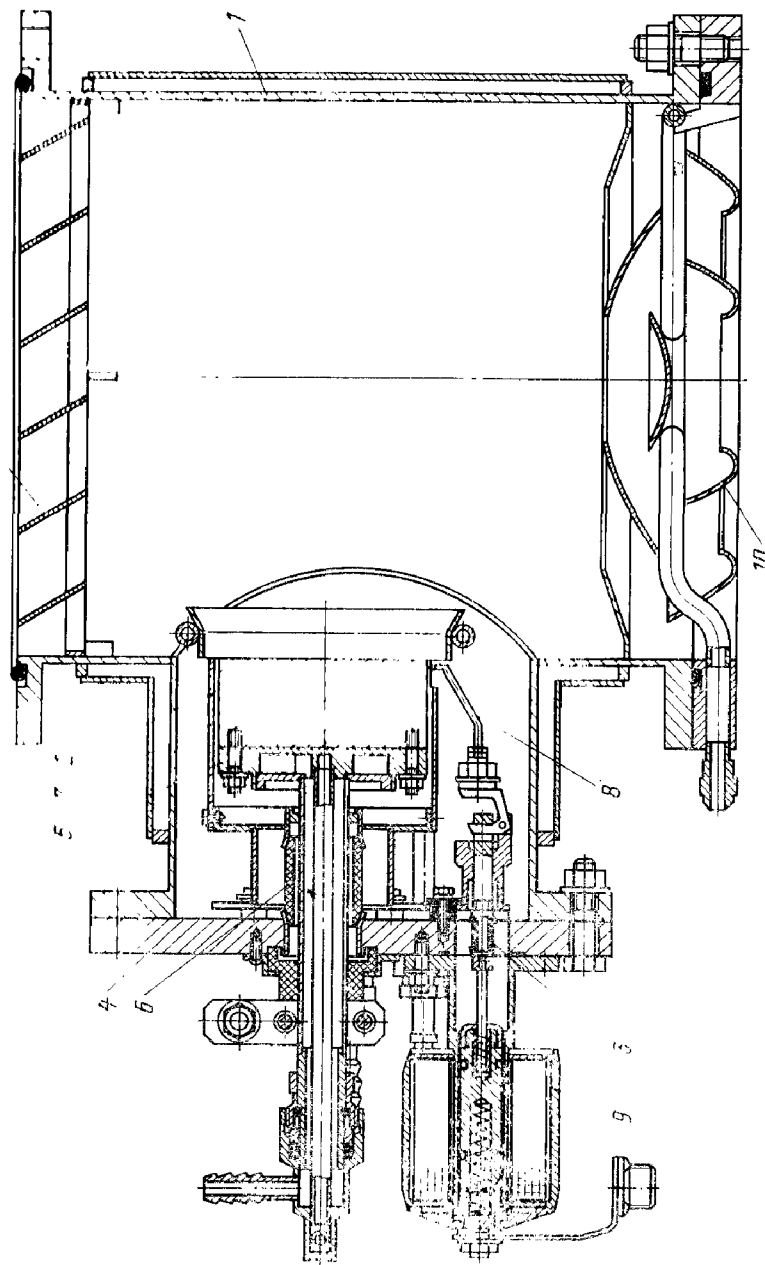


Рис. 11-27. Геттерный электродуговой насос.

общем фланце 4. Катод 2 представляет собой титановый диск диаметром примерно 95 мм и высотой 40 мм, который крепится титановыми шпильками к медному основанию 5, охлаждаемому водой. Боковые поверхности основания 5, титанового диска 2 и электрического силового ввода 6 закрыты металлическим экраном 7, предотвращающим возникновение дуги между поверхностями этих деталей и корпусом насоса — анода. В экране 7 предусмотрен вырез для подвода поджигающего электрода 8. Поджигающий электрод через сопротивление, ограничивающее ток короткого замыкания, соединен с корпусом насоса.

Питание дуги осуществляется от источника постоянного тока.

В простейшем случае таким источником может явиться обычный универсальный сварочный преобразователь. Возбуждение дуги производится кратковременным закорачиванием катода с поджигающим электродом. Для этого подают напряжение на электромагнит 9, который подводит электрод 8 к катоду 2. В момент отвода электрода 8 возвратной пружиной между катодом 2 и анодом — корпусом насоса возникает устойчивая электрическая дуга. Напряжение поджига дуги лежит в пределах 25—35 В, а ток стабильного горения дуги составляет примерно 140 А при напряжении 20—21 В. Скорость испарения титана при этом достигает 15—17 г/ч. Для уменьшения скорости испарения титана с целью более рационального его расходования применяют периодический режим работы насоса, причем чем ниже давление в откачиваемом объеме, тем больше делают паузу между моментами включения насоса.

При испарении титана на стенках насоса непрерывно образуется свежий активный слой, на поверхности которого и происходит контактное поглощение активных газов в результате физической адсорбции, хемосорбции, а также химических реакций и растворения газов в пленке титана.

Для откачки инертных газов к нижнему фланцу насоса через водоохлаждаемую ловушку 10 присоединяется паромасляный диффузионный насос, быстрота действия которого должна составлять 2—5% быстроты действия электродугового насоса.

Верхним фланцем, в сечении которого установлен отражательный экран 11, насос подсоединяется к откачи-

ваемому объему. Назначением экрана 11 является предотвращение попадания испаряющегося титана во внутреннюю полость откачиваемого объема.

Быстрота действия геттерных электродуговых насосов может достигать $10^3 - 10^5$ л/с и более. Предельное остаточное давление насоса составляет 10^{-5} Па при подкачке

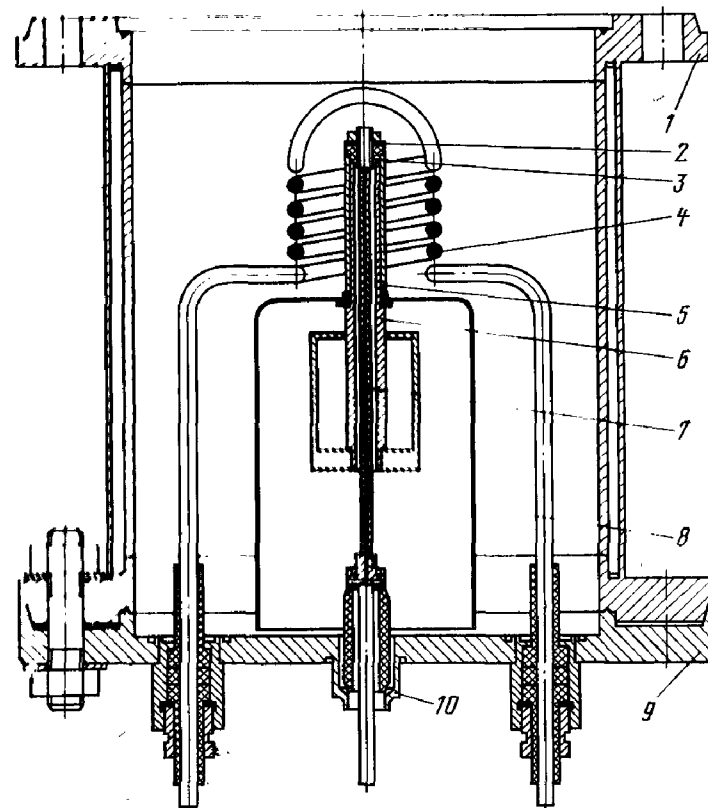


Рис. 11-28. Геттерный импульсно-дуговой насос.

инертных газов каким-либо дополнительным насосом и $(5 - 2) \cdot 10^{-4}$ Па, если такая подкачка не предусматривается.

Геттерные электродуговые насосы используют простые источники питания, снабжены большим количеством геттерного материала и просты по устройству [27].

Стремление увеличить срок службы насоса за счет более рационального расходования геттера и уменьшить инертность в работе привело к разработке геттерно-

го импульсно дугового насоса, макет которого показан на рис. 11-28 [97]. Насос содержит катодный узел, состоящий из водоохлаждаемого медного стержня 6 с надетым на него титановым цилиндром 5, водоохлаждаемый анодный узел 4, выполненный в виде бифилярной спирали из медной трубки, и поджигающее устройство, состоящее из вакуумного электрического ввода 10, токоподвода 7, пропущенного через керамическую трубку 8, керамического изолятора 3 и металлической шайбы 2. Все эти элементы собраны на фланце 9 и установлены в корпусе 1 насоса. Катодный узел насоса, так же как и корпус 1, заземлен.

Электрическая система насоса включает в себя источник разрядного тока с устройством для ограничения тока дуги и источник поджигающего напряжения.

В качестве источника разрядного тока может быть использован генератор, обеспечивающий получение переменного тока любой частоты (например, промышленной частоты 50 Гц) или создающий униполярные импульсы напряжения заданной амплитуды и длительности. Положительный вывод генератора соединен с анодом 4, а другой вывод заземлен.

Источник поджигающего напряжения должен обеспечивать возникновение дугового пробоя по поверхности керамического изолятора 3 между шайбой 2 и катодом — титановым цилиндром 5. Поджигающее напряжение в зависимости от длины изолирующей части изолятора 3 может составить от нескольких сотен до нескольких тысяч вольт. Положительный вывод источника соединен с токоподводом 7, а другой вывод заземлен.

При приложении поджигающего напряжения происходит пробой по поверхности керамического изолятора 3, в результате чего в верхней части титанового цилиндра 5 образуется катодное пятно и между анодом 4 и цилиндром 5 возникает дуговой разряд. Благодаря хаотическому движению катодного пятна происходит равномерное испарение титана со всей поверхности цилиндра 5 и напыление активной пленки на внутреннюю поверхность корпуса насоса через промежутки между витками анода 4.

Во время работы насоса поджигающее напряжение синхронизируется с напряжением, создаваемым источником разрядного тока, таким образом, чтобы подача поджигающих импульсов происходила при положитель-

ном полупериоде переменного напряжения или во время подачи униполярного импульса. Время подачи поджигающего импульса должно быть значительно меньше времени поддержания разрядного тока. В описываемом макете насоса в качестве поджигающего напряжения использовались импульсы амплитудой 1000 В и продолжительностью 100 мкс при максимальном разрядном токе между цилиндром 5 и анодом 490 А и рабочем цикле 8,3 мс.

Время между моментом подачи поджигающего импульса и концом положительного полупериода должно быть таким, чтобы испарить необходимое количество титана, обеспечивающее заданную быстроту действия насоса.

Быстрота действия насоса может регулироваться в широких пределах за счет подбора частоты подачи поджигающих импульсов, что в то же время обеспечивает весьма экономное расходование титана. В процессе работы насоса керамический изолятор 3 подвергается запылению титаном и термическому воздействию, которое может привести к потере изоляционных свойств, что и определяет в основном срок службы насоса.

Недостатками геттерных электродуговых насосов являются относительно высокое остаточное давление, необходимость применения достаточно чистых материалов для изготовления катода и интенсивное образование легкоотслаивающейся пленки геттерного материала.

Ионно-геттерные насосы. Как уже отмечалось, геттерные насосы малоэффективны при откачке инертных газов и для получения достаточно малых предельных остаточных давлений (менее 10^{-4} Па) требуют применения дополнительных насосов. В то же время при возбуждении и ионизации откачиваемых газов электронным потоком или в электрическом разряде поглощение газов активными пленками идет более интенсивно, причем благодаря ионизации откачиваются и инертные газы.

В современных ионно-геттерных насосах обычно совмещены геттерные и ионные методы откачки. Принцип действия ионно-геттерных насосов основан на поглощении газов периодически или непрерывно наносимой пленкой активного вещества (чаще всего титана) и улучшении откачки инертных газов и углеводородов за счет ионизации и улавливания положительных ионов отрицательно заряженными элементами насоса. Испарение

титана в ионно-геттерных насосах происходит, как правило, из твердой фазы.

На рис. 11-29 представлена схема ионно-геттерного насоса. Испарение титана на стенку водоохлаждаемого корпуса 4 насоса производится из твердой фазы с прямоканальных испарителей 2, представляющих собой молибденовый U-образный керн, на который нанесен слой иодидного титана.

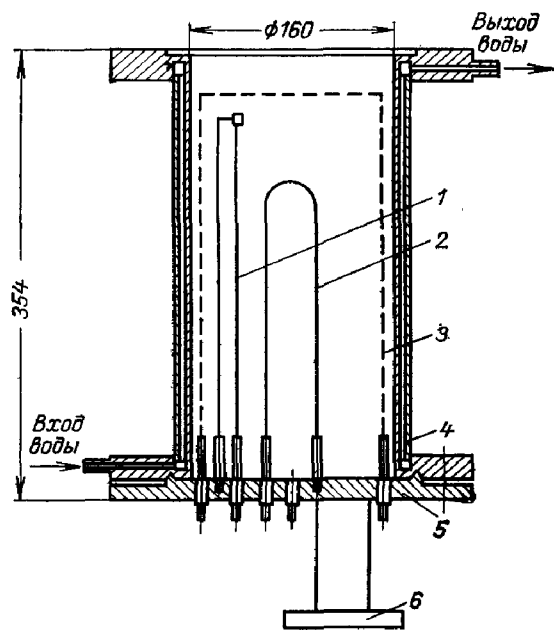


Рис. 11-29. Схема ионно-геттерного насоса.

1 — вольфрамовый катод; 2 — испаритель титана (титано-молибденовая шпилька); 3 — анод; 4 — корпус; 5 — фланец; 6 — патрубок для предварительной откачки.

Ионизация, необходимая для откачки инертных газов и углеводородов, осуществляется электронами, эмиттируемыми термокатодом 1.

Эффективность ионизации повышена за счет увеличения длины пробега электронов. Это достигается применением «прозрачного» для электронов анода 3, на который подается положительное относительно катода напряжение 1000—1200 В. Анод 3, выполненный из молибденовой проволоки, используется еще и в качестве внутреннего нагревателя для обезгаживания насоса при подготовке его к работе.

Коллектором ионов является корпус насоса с нанесенной титановой пленкой, в которую и внедряются образовавшиеся ионы.

Таким образом, химически активные газы поглощаются пленкой титана, непрерывно наносимой на внутреннюю поверхность корпуса насоса, а откачка инертных газов осуществляется за счет ионизации и последующего внедрения ионов в пленку геттера.

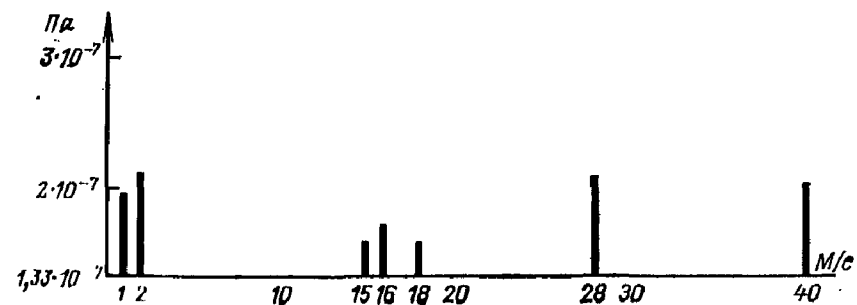


Рис. 11-30. Состав остаточных газов в ионно-геттерном насосе.

В составе остаточных газов ионно-геттерных насосов (рис. 11-30), помимо обычно присутствующих в вакуумных системах водорода ($M/e=2$ и 1), паров воды ($M/e=18$ и 17), а также азота и окиси углерода ($M/e=28$), наблюдаются аргон ($M/e=40$) и метан ($M/e=16$ и 15).

Дальнейшим развитием ионно-геттерных насосов с термическим испарением титана явились *орбитронные ионно-геттерные насосы*, в которых удачно сочетаются относительная простота конструкции с высокой стабильностью работы. Схема сверхвысоковакуумного орбитронного ионно-геттерного насоса показана на рис. 11-31.

Внутри корпуса 5 размещен центральный электрод (анод) 3 с титановым цилиндром 4. Верхняя часть электрода 3 защищена экранной трубкой 7. На пластине 8 укреплен керамический стержень 1, на котором крепится катод 2, изготовленный из вольфрамовой проволоки. Токовводом и экраном катода служит проволока 6 из тантала. Корпус насоса заземлен, а на центральный электрод 3 подается положительное напряжение величиной 4—5 кВ. Пластина и экранная трубка 7 име-

ют одинаковый с катодом потенциал. Расположение и конфигурация катода и токоввода 6 выбраны так, что осевая и радиальная симметрия электрического поля нарушена. Кроме того, к катоду приложено положительное напряжение смещения (от 50 до 250 В) относительно корпуса насоса. В результате электроны, эмиттируемые катодом, движутся со скоростью, имеющей осевую, радиальную и тангенциальную составляющие.

Ввиду того, что электрическое поле несимметрично и векторы скоростей электронов составляют некоторый угол по отношению к силовым линиям электрического поля, направление движения электронов будет непрерывно меняться и их попадание на центральный электрод, имеющий малое поперечное сечение, затруднено. Осаждение электронов на корпус также исключается благодаря наличию положительного смещения на катоде.

В результате электроны движутся по орбитам достаточно долго, проходят большие расстояния, и вероятность ионизации газа резко увеличивается. Часть электронов, траектории которых проходят вблизи центрального электрода 3, попадает на титановый цилиндр 4 и разогревает его до температуры примерно 1430 К. При этом происходят

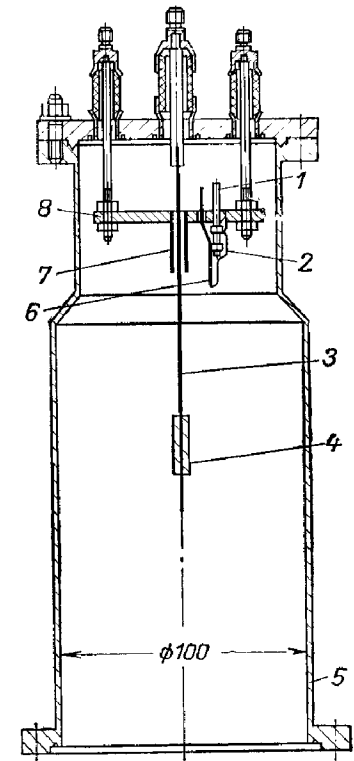


Рис. 11-31. Схема орбитронного ионно-геттерного насоса.

испарение титана и его конденсация на внутренней поверхности корпуса насоса.

Так же, как и в предыдущих конструкциях ионно-геттерных насосов, откачка активных газов орбитроном идет за счет поглощения их пленкой титана, непрерывно наносимой на внутреннюю поверхность корпуса насоса. При условии достаточной скорости испарения титана и вероятности прилипания молекул, близкой к единице,

скорость откачки активных газов будет ограничиваться в основном входным сечением насоса.

В отличие от описанных выше ионно-геттерных насосов в орбитроме за счет значительного увеличения длины свободного пути электронов (до нескольких метров) быстроота откачки инертных газов увеличена.

Следует отметить, что примененный в орбитронном насосе испаритель при достаточно большом запасе испаряемого вещества имеет небольшую тепловыделяющую поверхность, что позволяет размещать внутри насоса дополнительный экран, охлаждаемый жидким азотом и запываемый титаном; при этом резко уменьшается предельное остаточное давление насоса. Так, в орбитронном насосе СОН-А-1, имеющем постоянную быстроту действия 500 л/с в диапазоне давлений 10^{-6} — 10^{-9} Па, предельное остаточное давление достигает 10^{-11} Па.

Заключивая рассмотрение ионно-геттерных насосов с термическим испарением титана, следует указать на их основные недостатки, заключающиеся в отсутствии саморегулирования скорости испарения активного вещества, наличии накаливаемых элементов в электродной системе и в некоторой сложности системы электропитания.

Магнитные электроразрядные насосы. В отличие от описанных выше ионно-геттерных насосов с термическим испарением титана в магнитных электроразрядных насосах для получения активных пленок и для ионизации газов используется газовый разряд в магнитном поле. Вследствие этого в магнитных электроразрядных насосах устранен такой существенный недостаток, присущий ионно-геттерным насосам, как наличие накаливаемых элементов электродной системы.

Схема простейшего диодного магниторазрядного насоса показана на рис. 11-32. Анод 1 насоса образован из отдельных разрядных ячеек, с открытых концов которых расположены общие катоды 2 из активного материала (титана).

Эта электродная система помещается в магнитное поле H , перпендикулярное плоскости катодов. При подаче на электроды разности потенциалов в несколько киловольт в ячейках возникает газовый разряд, поддерживающийся в широком диапазоне давлений. Положительные ионы газов, образующиеся в разряде при соударении электронов с молекулами, ускоряются элект-

рическим полем в направлении катодов и внедряются в них, вызывая распыление материала катодов. Распыленный с катодов титан осаждается на поверхностях электродов. Однако непрерывно возобновляемая пленка титана образуется главным образом на аноде. Что касается большей части поверхности катодов, то она интенсивно распыляется, причем происходит постоянная

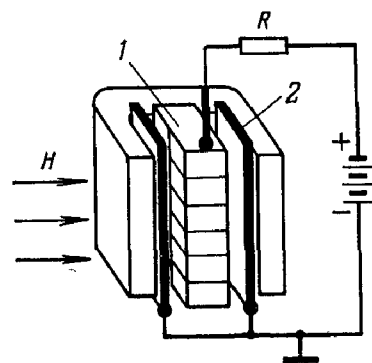


Рис. 11-32. Схема диодного магнитного электроразрядного насоса.

1 — анод; 2 — катод; R — балластное сопротивление; H — направление магнитного поля.

убыль материала. Активные газы (N_2 , O_2), присутствующие в вакуумной системе, попадая на свеженанесенную на аноды пленку, связываются на ней, образуя устойчивые химические соединения с титаном.

Образующиеся при реакциях устойчивые соединения — нитриды или окислы титана — могут возникать и на катоде в момент попадания туда ионов или молекул этих газов, однако из-за сильного распыления материала катода активные газы в конце концов оказываются в основном на аноде, оставаясь лишь на тех участках катода, которые почти не подвергаются ионной бомбардировке.

Сложные газы, пары воды, углекислый газ, аммиак, углеводороды, по-видимому, диссоциируют в разряде. Ионы осколков молекул также вызывают распыление материала катода [8].

Ионы легких газов (водород, дейтерий, гелий) не вызывают заметного распыления материала катода, так что для них более существенным является второй механизм откачки: ионы легких газов, имеющие малые размеры, могут внедряться в материал катода и диффундировать в него.

Первоначально высокая быстрота действия насоса по этим газам постепенно уменьшается, особенно для гелия, не образующего с титаном твердых растворов. При бомбардировке материала катода ионами тяжелых газов или при нагреве его разрядом до температуры выше 470 К наблюдается обратное выделение легких га-

зов. Тяжелые инертные газы — аргон, криптон и ксенон — откачиваются благодаря адсорбции ионов катодом. Вследствие больших молекулярных размеров диффузия этих газов в катод затруднена, и первоначально высокая быстрота действия насоса по этим газам резко уменьшается. Поглощение этих газов происходит в основном на периферийных участках ячеек, куда напыляется титан, интенсивно распыляемый тяжелыми ионами из центральных частей ячеек катода. При откачке аргона с давлением около 10^{-3} Па и при длительной откачке воздуха с давлением большим или равным 10^{-3} Па, содержащего 1% аргона, наблюдаются резкие периодические всплески давления, называемые *аргонной нестабильностью*. По-видимому, это происходит из-за периодически возникающей нестабильности разряда, которая приводит к превышению скорости распыления над скоростью напыления титана в тех местах, где при обычных условиях происходит стабильное напыление титана. Тем не менее присутствие аргона с парциальным давлением меньше 10^{-3} Па часто оказывается полезным, так как при этом интенсифицируется распыление материала катода и увеличивается скорость откачки активных газов.

Чем больше давление в насосе, тем больше ионов поступает на катод (увеличивается ионный ток) и тем больше будет распыление катодов; при понижении давления ионный ток и распыление катодов уменьшаются. Таким образом, важной особенностью магниторазрядных насосов является своеобразная *авторегулировка скорости распыления* катодов, обеспечивающая экономное их расходование и большой срок службы насоса. Поскольку ионный ток приблизительно пропорционален давлению, он часто используется для оценки давления в насосе и откачиваемом объеме.

Простота устройства и возможность работы в любом положении также выгодно отличают магниторазрядные насосы от других.

Для понимания работы магниторазрядных насосов, помимо различий в механизме поглощения различных газов, необходимо иметь в виду изменение характера газового разряда с изменением давления. При давлениях больших или равных 10^{-1} Па ток разряда велик вследствие большой электропроводности разрядного промежутка; чтобы разряд при этом не перешел в дуговой, ток

разряда специально ограничивается (в малых насосах используется балластное сопротивление R , показанное на рис 11 32, в крупных насосах используют более сложные электрические цепи), что приводит к уменьшению падения напряжения на разрядном промежутке. При этом уменьшается энергия ионов и, следовательно, резко снижается скорость распыления материала катодов. Поэтому быстрота действия насоса при высоких давлениях невелика, а относительно большой ток вызывает разогрев электродов и сильное газовыделение, вследствие чего давление в системе повышается. В этих условиях целесообразно продолжать откачку насосом предварительного разрежения до начала периода старта, когда эффект откачки магниторазрядным насосом становится заметным.

В период пуска, который может продолжаться от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от состояния и предыстории насоса, давление понижается от 1 до 10^{-2} Па и разряд принимает форму, характерную для высокого вакуума. Сопротивление разрядного промежутка увеличивается, ток уменьшается, и происходит рост анодного напряжения, что ведет к увеличению быстроты действия насоса. Период пуска завершается относительно быстрым переходом в область высокого вакуума: ток продолжает уменьшаться пропорционально давлению, анодное напряжение и быстрота действия насоса достигают номинальных значений.

Конструкции магниторазрядных насосов довольно разнообразны, что объясняется различиями в условиях их применения. В одних случаях от насоса требуется длительная работа в области предельно низких давлений, в других насос должен использоваться в циклических производственных процессах с частыми пусками от атмосферного давления. В ряде случаев от магниторазрядного насоса требуется повышенная эффективность откачки водорода и инертного газа и т.п.

Быстрота действия одних ячеек промышленных насосов составляет примерно 1 л/с, так что для получения высокой быстроты действия в насосах используется несколько электродных блоков, каждый из которых содержит большое количество ячеек.

Как отмечалось, недостатком магниторазрядных насосов является длительный пусковой период. Кроме того, неохлаждаемые диодные магниторазрядные насосы

типа НМД не могут запускаться при давлении более 1 Па и длительно работать при давлениях больших или равных 10^{-2} Па также из-за перегрева электродов.

Этот недостаток устранен в диодных магниторазрядных насосах типа НМДО с водяным охлаждением анодов электродного блока, что позволяет успешно запус-

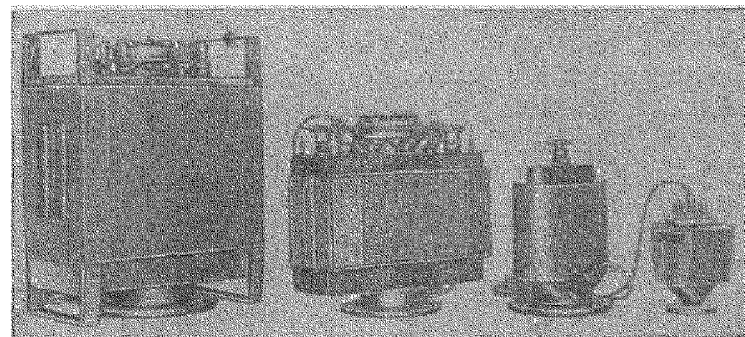


Рис 11 33 Магнитные электроразрядные насосы с охлаждаемыми анодами

кать эти насосы при давлении меньшем или равном $6,5$ Па и длительно работать при давлении 10^{-1} Па.

В насосах с водоохлаждаемым анодом (НМДО) в отличие от насосов типа НМД высокое отрицательное напряжение подается на катоды, изолированные от корпуса. Анод насоса заземлен, что значительно упрощает конструкцию, так как устраняет необходимость электрической изоляции линии водяного охлаждения. Серия магнитных электроразрядных насосов с охлаждаемыми анодами (типа НМДО) показана на рис 11 33.

Недостатком диодных магниторазрядных насосов является малая быстрота действия по инертным газам (табл 11 4). Этот недостаток устраняется в *триодном магниторазрядном насосе*, схема которого показана на рис 11 34.

Возникший разряд поддерживается в системе ограниченной анодом 1 и двумя ячейчатыми титановыми катодами 2. Образовавшиеся в разряде положительные ионы ускоряются электрическим полем и устремляются к катодам. При этом происходит как бы разделение

ионов на две группы. Одна группа, бомбардируя титановые катоды 2, вызывает их распыление. Другая группа ионов пролетает сквозь ячейки катодов и движется по направлению к коллекторам 3. Потенциал коллекторов таков, что позволяет собрать пролетающие через ячейки катода положительные ионы, которые связываются попадающим на коллектор титаном. Положительные ионы, пролетающие через катоды, обладают низкой энергией и не могут вызвать распыления материала коллекторов. Таким образом, в электроразрядных магнитных насосах триодного типа за счет увеличения запыляемой титаном поверхности достигается большая по сравнению с диодными насосами удельная быстрота откачки. Так, например, по сравнению с одной ячейкой диодного насоса быстрота откачки триодной ячейки по азоту возрастает в 4 раза, а по аргону — более чем в 10 раз.

Таблица 11-4

Относительная быстрота действия диодного магниторазрядного насоса по разным газам

Газ	Быстрота действия, %	Газ	Быстрота действия, %
Водород	270	Воздух	100
Метан	270	Оксид углерода	85
Дейтерий	190	Углекислый газ	85
Аммиак	170	Кислород	55
Легкие углеводороды	90—160	Гелий	10
Этиловый эфир	135	Неон	4
Пары воды	130	Аргон	1
Азот	100		

Как уже отмечалось, напыление титана на поверхности, охлаждаемые до температуры жидкого азота, приводит не только к снижению равновесного давления газов, но и к увеличению быстроты действия. Эта особенность используется в электроразрядном магнитном насосе типа ТРИОН-150, общий вид которого представлен на рис. 11-35. Охлаждение электродов (анода и коллекторов) жидким азотом дает возможность получить предельное остаточное давление порядка 10^{-9} Па. При работе насоса в области повышенных давлений в связи с резким увеличением выделяющейся на электродах мощности значительно возрастает расход жидкого азота. Поэтому с целью уменьшения эксплуатационных расхо-

дов предусмотрена возможность работы насоса ТРИОН-150 с водяным охлаждением.

Состав остаточных газов в хорошо обезгаженной системе, откачиваемой магниторазрядным насосом, состо-

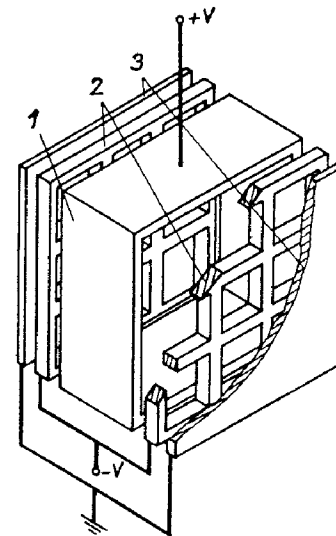


Рис. 11-34. Электродная система триодного магнитного электроразрядного насоса.

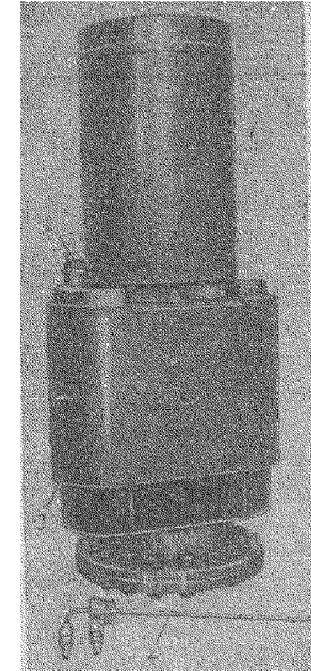


Рис. 11-35. Триодный охлаждаемый насос типа ТРИОН-150.

1 — теплоизоляционный сосуд; 2 — электрод; 3 — магнитная система; 4 — тройник водяного охлаждения.

ит из обычно присутствующих во всех вакуумных системах водорода ($M/e=2$ и 1) и N_2+CO ($M/e=28$), в спектре имеются аргон ($M/e=40$ и 20) и метан ($M/e=16$ и 15).

Разработанные блоки питания к магнитным электроразрядным насосам имеют характеристики, близкие к линейным, при которых максимальная мощность выделяется при наибольших давлениях устойчивой работы. С увеличением мощности блока питания возрастает быстрота действия насоса в области высоких давлений, но одновременно возрастают габариты и масса источника питания, тепловыделение на электродах насоса и возникает опасность дугового разряда между электрода-

ми. В связи с этим обычно разрядный ток для диодных неохлаждаемых насосов, приходящийся на одну ячейку, ограничивают сверху величиной 0,5 мА, для охлаждаемых диодных насосов — 3 мА и триодных насосов — 4 мА.

Магниторазрядные насосы позволяют создавать разрежения порядка 10^{-7} — 10^{-9} Па. Для достижения таких низких давлений магниторазрядные насосы, так же как и ионно-геттерные, нуждаются в предварительном обезгаживании.

При предварительном обезгаживании откачка насоса до давления 10 — 10^{-1} Па может производиться адсорбционными насосами.

Откачку при обезгаживании можно также производить пароструйным диффузионным насосом с обязательным использованием эффективной ловушки. Прогрев магниторазрядных насосов при обезгаживании осуществляется обычно внешними нагревательными элементами.

Долговечность магниторазрядных насосов составляет десятки тысяч часов при работе на давлениях меньших или равных 10^{-4} Па и определяется главным образом местным разрушением катодных пластин или коротким замыканием в электродной системе. В случае откачки больших количеств водорода долговечность насоса может сильно уменьшиться из-за коробления катодов (в результате насыщения водородом) и замыкания электродной системы. При этом необходима смена катодов. Замыкание электродов может произойти также из-за отслаивания образующейся на аноде пленки титана после длительной работы насоса.

К недостаткам магнитных электроразрядных насосов следует отнести некоторую громоздкость и большую массу по сравнению с геттерно-ионными насосами с той же быстротой действия.

11-6. КРИОГЕННЫЕ НАСОСЫ

Принцип действия криогенных насосов основан на том, что при температурах, близких к температуре жидкого водорода или гелия, большинство веществ имеет весьма низкую упругость паров. Так, например, при температуре, близкой к точке кипения водорода, давление насыщенных паров O_2 составляет 10^{-11} Па, N_2 и CO — 10^{-9} Па, а Ar — 10^{-15} Па.

При температуре, близкой к точке кипения гелия, упругость насыщенного пара H_2 составляет 10^{-4} Па, а Ne — 10^{-17} Па. На поверхности, заключенной в герметичный объем и охлажденной до температур, близких к точке кипения жидкого водорода, будут конденсироваться молекулы всех газов, за исключением He , H_2 и Ne . При охлаждении поверхности до температуры, близкой к точке кипения гелия, на ней будут конденсироваться молекулы всех газов, кроме гелия. Удельная быстрота откачки и предельное остаточное давление криогенного насоса могут быть рассчитаны на основе метода баланса потоков газа, конденсирующегося на холодной поверхности и испаряющегося с нее [94]:

$$S_{н.уд} = 3,64 \cdot 10^4 \alpha \left(\frac{T_1}{M} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \frac{\alpha_n p_{нас}}{\alpha p} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{1/2} \right\}, \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (11-11)$$

где p и T_1 — давление и температура газа, падающего на холодную поверхность, Па и К; $p_{нас}$ — давление насыщенного пара сконденсированного газа при температуре холодной поверхности T_2 , Па; M — молекулярная масса газа; α — коэффициент прилипания; α_n — отношение количества газа, испаряющегося с 1 м^2 холодной поверхности за 1 с, к количеству газа, которое теоретически должно было испаряться в равновесных условиях.

Предельное остаточное давление $p_{ост}$ определяется как давление, при котором $S_{н.уд} = 0$:

$$p_{ост} = \frac{\alpha_n}{\alpha} p_{нас} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{1/2}. \quad (11-12)$$

Выражение для $S_{н.уд}$ можно переписать в виде

$$S_{н.уд} = S_0 \left(1 - \frac{p_{ост}}{p} \right), \quad (11-13)$$

где

$$S_0 = 3,64 \cdot 10^4 \alpha \left(\frac{T_1}{M} \right)^{1/2}, \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Эта зависимость представлена графиком на рис. 11-36. Как видно из кривой, при давлениях $p \gg p_{ост}$ $S_{н.уд}$ практически не зависит от давления и приближенно равно S_0 . Для воздуха при 293 К эта величина со-

Ставляет $11,6 \cdot 10^4$ л/(м²·с). Таким образом, каждый квадратный метр охлажденной поверхности теоретически обеспечивает откачку воздуха со скоростью $11,6 \times 10^4$ л/с, хотя быстрота откачки разных компонентов воздуха отличается одна от другой. Скорости откачки компонентов воздуха обратно пропорциональны давлению насыщенных паров; так, гелий и водород имеют наименьшую скорость откачки.

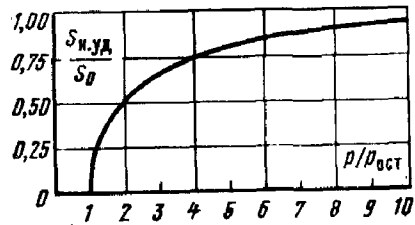


Рис. 11-36. Зависимость $S_{н.уд}/S_0$ от $p/p_{ост}$.

Конденсационные насосы. По принципу конденсации газов поверхностью, охлажденной до точки кипения водорода (20,4 К), выполнен водородный конденсационный насос типа ВК-40, чертеж которого изображен на

рис. 11-37. Основным элементом насоса является медный сосуд 9, заполняемый жидким водородом. Для уменьшения теплопритока от окружающих стенок сосуд окружен цилиндрическим медным экраном 8, охлаждаемым жидким азотом. Задний экран с впаянной ловушкой 2 также охлаждается жидким азотом.

Для откачки не конденсирующихся при температуре жидкого водорода газов (водород, гелий, неон) и создания предварительного разрежения насос ВК-40 снабжен пароструйным диффузионным насосом 7 с быстротой действия около 2000 л/с.

Для предотвращения попадания паров масла и продуктов его крекинга из паромасляного диффузионного насоса 7 предусмотрены водяная ловушка 6 и жалюзийная азотная ловушка 4. Жидкий азот для охлаждения экранов и ловушки подается из сосудов Дьюара 1 и 13.

Питание насоса жидким водородом осуществляется от автономного ожижителя 12. Применение автономного ожижителя позволяет использовать не только скрытую теплоту парообразования водорода, но и его пары, имеющие еще достаточно низкую температуру.

Площадь наружной поверхности сосуда 9 равна 0,5 м², и теоретическая быстрота действия насоса по воздуху составляет свыше 55 000 л/с. Практически быстрота действия несколько меньше из-за ограничен-

ной проводимости впускного отверстия насоса и составляет 40 000 л/с в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-5}$ Па. Предельное остаточное давление, создаваемое насосом, составляет $1 \cdot 10^{-8}$ Па при расходе жидкого водорода 0,4 л/ч и жидкого азота 10—20 л/ч. После длительной работы расход жидкого водорода возрастает до 2 л/ч, так как

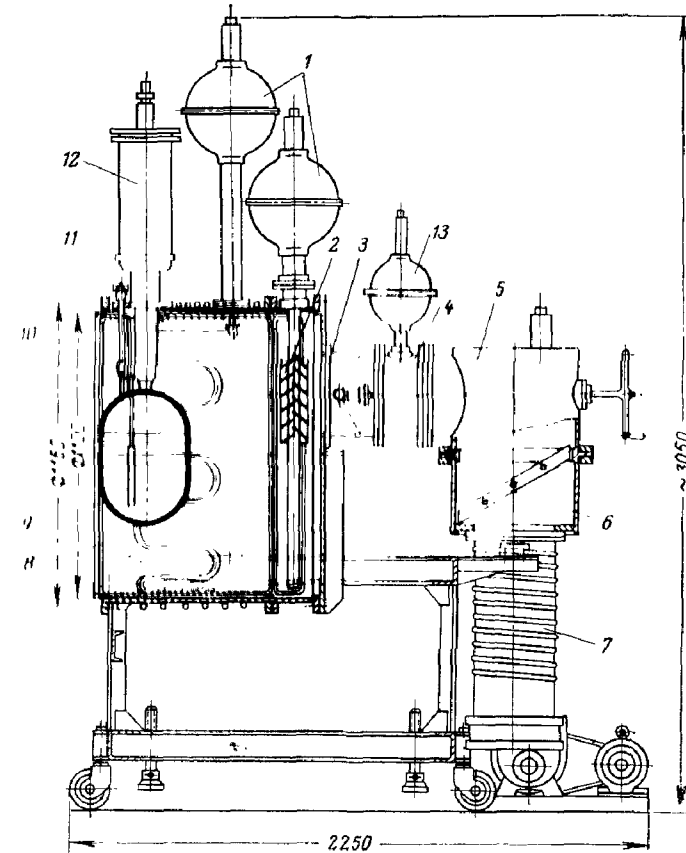


Рис. 11-37. Конденсационный насос.

1, 13 — сосуды Дьюара; 2, 4 — азотные ловушки; 3 — кран; 5 — переходник; 6 — водяная ловушка; 7 — пароструйный диффузионный насос; 8 — экран; 9 — медный сосуд; 10 — корпус; 11 — дросселирующий кран; 12 — ожижитель.

увеличивается приток тепла за счет излучения вследствие загрязнения сконденсировавшимися газами и парами внешней поверхности сосуда 9.

К недостаткам насоса ВК-40 можно отнести сравнительную сложность обслуживания и необходимость в постоянном наблюдении за работой ожижителя и компрес-

сора. Конструкция насоса не допускает прогрева, так как большинство узлов выполнено пайкой мягкими припоями, а уплотнение разъемных соединений осуществлено с помощью резиновых уплотнителей.

Работа с водородом требует соблюдения ряда известных мер предосторожности.

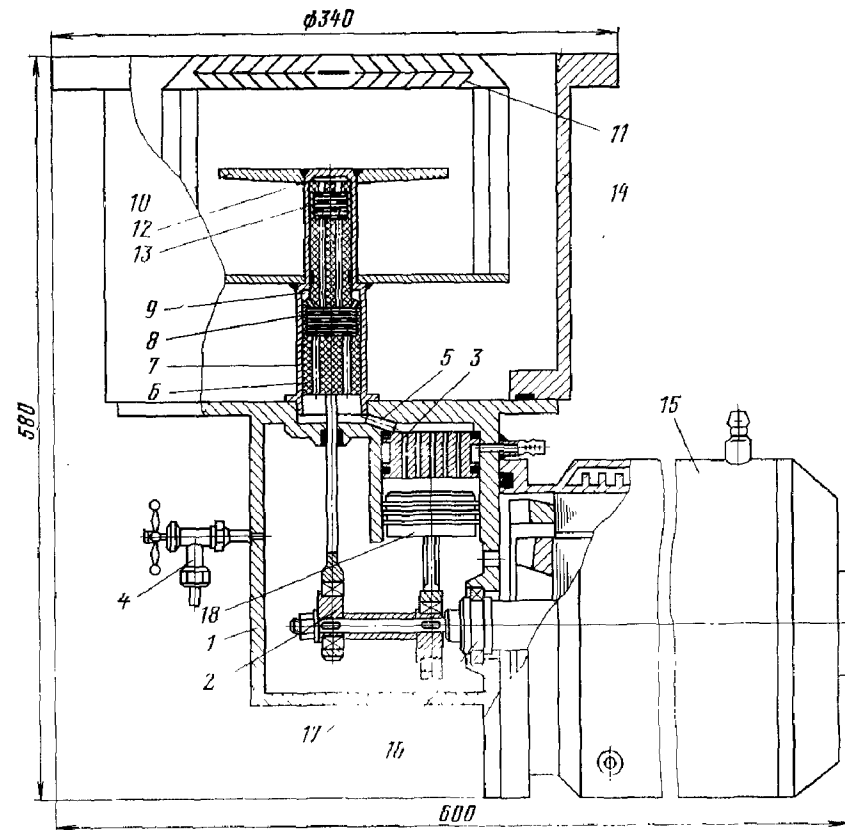


Рис. 11-38. Конденсационный насос со встроенным криогенератором. 1 — картер; 2, 17 — эксцентриковые втулки; 3 — водяной холодильник; 4 — кран; 5 — канал; 6 — дифференциальный вытеснитель; 7 — цилиндр; 8, 13 — регенераторы; 9 — полость расширения первой ступени; 10 — криопанель; 11 — жалюзийный экран; 12 — полость расширения второй ступени; 14 — корпус насоса; 15 — электродвигатель; 16 — вал; 18 — компрессорный поршень.

В последнее время все большее распространение получают конденсационные насосы, в которых для охлаждения поверхностей вместо взрывоопасного водорода используют газовые холодильные машины (криогенераторы), обычно являющиеся неотъемлемой частью насоса.

Особенно удачными оказались двухступенчатые криогенераторы, обеспечивающие на первой ступени температуру 50—80 К, необходимую для охлаждения защитных экранов, а на второй ступени — 12—20 К для охлаждения конденсационной поверхности насоса.

На рис. 11-38 показан конденсационный насос с использованием двухступенчатой холодильной машины, работающей по обращенному циклу Стирлинга [42, 95].

В корпусе насоса 14 размещена криопанель 10, изготовленная из меди и являющаяся откачивающим элементом насоса. Криопанель 10 имеет хороший тепловой контакт со второй ступенью машины. Для снижения теплопритока к криопанели 10 со стороны теплых стенок насоса и откачиваемого объема предусмотрен жалюзийный экран 11, который имеет хороший тепловой контакт с первой ступенью машины 7. Температура экрана 11 поддерживается на уровне 90—100 К.

В картере 1 размещены компрессорный поршень 18 и шатуны привода, сидящие на эксцентриковых втулках 2 и 17 вала 16 вращаемого электродвигателя 15. Картер 1 криогенератора через кран 4 заправляется газообразным гелием под давлением $(16-20) \cdot 10^5$ Н/м².

Криогенератор работает следующим образом. Газ, сжатый компрессорным поршнем 18 до давления $(35-40) \cdot 10^5$ Н/м², поступает в водяной холодильник 3, где отводится теплота сжатия. Затем газ по каналу 5 проходит через сетчатый регенератор 8, расположенный в вытеснителе. Часть газа поступает в полость расширения 9 первой ступени, а другая часть, пройдя регенератор 13, поступает в полость расширения 12 второй ступени.

При движении вытеснителя вниз происходят расширение газа в обеих ступенях и его охлаждение. В описываемой конструкции хладопроизводительность первой ступени составляет примерно 10 Вт при 100 К, а во второй ступени примерно 4 Вт при 25 К. При площади криопанели 0,05 м² насос обладает быстротой действия около 1100 л/с при давлении $1 \cdot 10^{-2}$ Па.

Конденсационные насосы нашли применение в установках для нанесения тонких пленок и вакуумных печах отжига.

Одним из главных недостатков конденсационных насосов, использующих встроенные криогенераторы, явля-

ется пока еще малый срок непрерывной работы, составляющий всего 1000 ч.

Криосорбционные насосы. Основным отличием криосорбционных насосов от конденсационных, описанных выше, является повышенная сорбционная емкость, достигаемая за счет применения адсорбентов, охлаждаемых до сверхнизких (криогенных) температур. В качестве адсорбента в криосорбционных насосах могут использоваться цеолиты, активированный древесный уголь, пористый никель, оксидная пленка алюминия и другие материалы. По конструкции криосорбционные насосы мало отличаются от конденсационных. При полном насыщении адсорбента газом криосорбционный насос становится конденсационным, однако при низких давлениях (10^{-4} — 10^{-5} Па) они способны сотни и даже тысячи часов работать без использования вспомогательного насоса для откачки низкокипящих газов.

На рис. 11-39 показана схема криосорбционного заливного насоса, состоящего из цилиндрического сосуда 1 с ребрами 2 [12]. Цилиндрический сосуд 1 изготовлен из алюминиевого сплава АД1, на поверхности которого анодным окислением создана высокопористая оксидная пленка алюминия толщиной 120—150 мкм, являющаяся сорбентом. Оксидная пленка алюминия обладает большой сорбционной емкостью и по сравнению с гранулированными сорбентами имеет хорошую теплопроводность, малую тепловую инерционность и высокую механическую прочность.

Внутри сосуда 1 с помощью переливного устройства, вводимого в горловину 3, заливается жидкий гелий. Ребра 2 служат для увеличения геометрической поверхности сорбента, за счет чего повышаются сорбционная емкость, коэффициент захвата газов и, следовательно, быстрота действия насоса. С целью снижения теплопритока сосуд 1 защищен жалюзийным экраном 4, который охлаждается испаряющимся газообразным гелием. В свою очередь экран 4 окружен оптически плотным жалюзийным экраном 5 и глухим экраном 6, которые охлаждаются жидким азотом, находящимся в резервуарах 7 и 8. Такая система промежуточных экранов обеспечивает дифференциальную откачку отдельных компонентов газа на различных температурных уровнях, что позволяет более рационально использовать емкость сорбента, нанесенного на сосуд 1. Действительно, при

откачке объема вначале конденсируются углекислый газ и пары воды на экранах 5 и 6, температура которых поддерживается в пределах 78—90 К, а затем на экране 4, охлажденном до температуры 25—30 К, происходит конденсация всех остальных газов, кроме гелия, водорода и неона, и, наконец, на ребрах 2 сосуда 1, имеющих температуру около 4,2 К, сорбируются низкокипящие газы, а также та часть всех газов, которые не сконденсировались на экранах 4, 5 и 6.

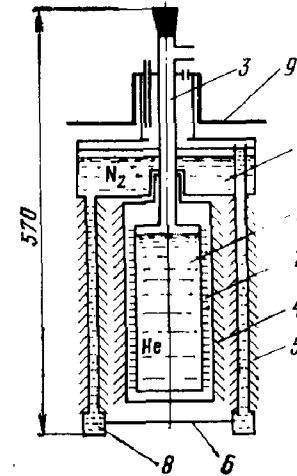


Рис. 11-39. Схема криосорбционного заливного гелиевого насоса.

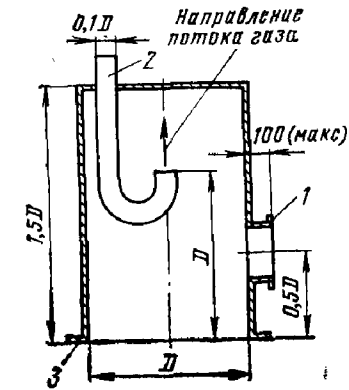


Рис. 11-40. Схема измерительной камеры.

1 — фланец для присоединения манометрического преобразователя и масс-спектрометра; 2 — напускная трубка; 3 — фланец для присоединения испытываемого насоса.

Криосорбционный насос целесообразно устанавливать непосредственно внутри откачиваемого объема, для чего предусмотрен фланец 9. Предельное остаточное давление, создаваемое криосорбционным насосом после обезгаживания цилиндрического сосуда 1, при температуре 4,2 К составляет 10^{-9} Па.

Несмотря на относительную простоту конструкции, криосорбционные гелиевые насосы обладают существенными недостатками, состоящими в необходимости периодической заливки жидкого гелия и азота, трудности автоматизации и контроля наличия хладагентов, а также в транспортировке жидкого гелия и сборе газообразного дорогостоящего газа. Для сбора испаряющегося в насосе гелия применяют мягкий газгольдер, откуда ком-

прессором гелий перекачивают в стандартный баллон с давлением $15 \cdot 10^6$ Н/м².

С целью упрощения эксплуатации криосорбционных насосов в настоящее время разработаны насосы со встроенными криогенераторами, работающими по замкнутому циклу практически без расхода рабочего газа

11-7. КОНТРОЛЬ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

При изготовлении и эксплуатации вакуумных насосов возникает необходимость в периодической проверке основных эксплуатационных параметров насосов. Как уже упоминалось в § 11-1, к таким параметрам относят *быстроту действия, предельное остаточное давление, наибольшее впускное и наибольшее выпускное давления*. Измерения параметров обычно проводят на испытательной установке, которая содержит, кроме испытуемого насоса, измерительную камеру, средства измерения давления и потока газа, масс-спектрометрические датчики и необходимую коммутирующую аппаратуру.

С тем, чтобы исключить ошибки в измерениях, рабочая камера всегда выбирается определенных размеров (рис 11-40). Так, диаметр измерительной камеры рекомендуется брать для большинства типов насосов (кроме механических и адсорбционных) равным диаметру входного отверстия насоса, но не менее 100 мм. При входных отверстиях меньше 100 мм между камерой и насосом устанавливают соответствующий переходник.

Измерение быстроты действия насосов. Хотя известно много экспериментальных методов измерения быстроты действия насосов, в промышленности и лабораторной практике рекомендован метод, при котором измеряют поток газа, напускаемого в измерительную камеру, и затем по соответствующим соотношениям определяют быстроту действия насоса. В зависимости от ожидаемой производительности насоса применяют различные методы измерения потока газа (см гл 16).

При измерении быстроты действия механических насосов измерительная камера должна иметь объем не менее пяти объемов всасывания за один оборот ротора насоса, т е

$$V_{\kappa} \geq 5V_{\text{вс}} \geq 5 \frac{S_{\text{н}}}{n/60} \geq 300 \frac{S_{\text{н}}}{n}, \text{ л}, \quad (11-14)$$

где V_{κ} — объем измерительной камеры, л, $V_{\text{вс}}$ — объем всасывания за один оборот ротора насоса, л, $S_{\text{н}}$ — ожидаемая быстрота действия насоса, л/с, n — частота вращения ротора, об/мин.

Измерение быстроты действия насоса проводят методом *постоянного давления*. Для этого откачивают измерительную камеру до давления $0,1p_{\text{н}}$ ($p_{\text{н}}$ — давление, при котором требуется измерить быстроту действия). Затем с помощью натекавателя напускают в измерительную камеру газ до установления давления $p_{\text{н}}$ и измеряют при этом одним из способов (см гл 16) поток напускаемого газа $Q'_{\text{н}}$. Так, если поток газа лежит в пределах от 1113 до $0,16$ м³·Па/с, применяют для его измерения *ротаметры*, если в пределах от 2 до $1,3 \cdot 10^{-5}$ м³·Па/с — *измерительные бюретки*, и наконец, при потоках газа меньше $1,3 \cdot 10^{-5}$ м³·Па/с измеряют поток методом *калиброванного сопротивления и двух манометрических преобразователей* (см 16-7).

По формуле (11-2) вычисляют быстроту действия насоса при данном давлении $p_{\text{н}}$. Устанавливая натекателем различные давления $p_{\text{н}}$ в измерительной камере и измеряя при этом поток напускаемого газа, снимают таким образом зависимость быстроты действия насоса от впускного давления $S_{\text{н}} = f(p_{\text{н}})$. При испытаниях газобалластных насосов проводят измерение быстроты действия насоса с закрытым и открытым газобалластным устройством.

Измерение быстроты действия насосов других типов осуществляется аналогичным образом.

При определении характеристик адсорбционных насосов вместо быстроты действия обычно находят максимальный объем $V_{\text{макс}}$, откачиваемый адсорбционным насосом от давления 10^5 Па до давления 1,3 Па за установленное время (см ОСТ 11 295 019-73).

Измерение предельного остаточного давления. У насосов объемного действия обычно измеряют полное предельное остаточное давление газов и паров. Для этого производят откачку измерительной камеры до тех пор, пока в ней установится так называемое равновесное давление, т е такое давление, которое затем в течение следующих 3 ч изменится не более чем на 10%.

Это установившееся равновесное давление и принимают за предельное остаточное давление насоса.

Измерение предельного остаточного давления газов у насосов других типов производится аналогичным образом, с той лишь разницей, что перед манометрическим преобразователем, как правило, устанавливают азотную ловушку и до измерений проводят обезгаживание насоса (если это предусмотрено его конструкцией) и измерительной камеры.

Обычно при измерении предельного остаточного давления сверхвысоковакуумных насосов осуществляют прогрев измерительной камеры и манометрических преобразователей до температуры 600—750 К в течение 12—24 ч. За предельное остаточное давление в этом случае принимают давление, полученное через 24 ч после включения прогрева.

Следует также особо подчеркнуть, что часто возникают ошибки в измерении предельного остаточного давления, связанные с малой проводимостью трубопровода, соединяющего измерительную камеру с манометрическим преобразователем. Обычно эта проводимость должна быть не менее 50 л/с. Однако во всех случаях предпочтительней использовать манометрические преобразователи открытого типа.

Измерение наибольшего выпускного давления. Для измерения наибольшего выпускного давления, соответствующего максимальной производительности насоса, откачивают измерительную камеру до давления, в 10 раз меньшего, чем давление, при котором производительность насоса максимальная. Затем натекателем, установленным на магистрали, соединяющей выпускной патрубок насоса с насосом предварительного разрежения, напускают газ до тех пор, пока давление в измерительной камере не возрастает на 50% ранее достигнутого давления. Давление, измеренное в этот момент на выпускном патрубке насоса, принимают за наибольшее выпускное давление.

Наибольшее давление запуска и время пуска сорбционного насоса. Измерение наибольшего давления запуска проводят главным образом у сорбционных насосов, нормальная работа которых во многом зависит от этого параметра.

Для этого натекателем устанавливают в измерительной камере давление, равное предполагаемому наибольшему давлению запуска. Если при последующей работе насоса в течение 1 ч давление в измерительной камере

меняется не более чем на 10%, то давление на входе в насос принимают за наибольшее давление запуска.

При испытаниях сорбционных насосов иногда определяют время пуска насоса. Для этого откачивают измерительную камеру до давления $p=10^{-4}$ Па и выключают насос. Затем натекателем напускают в измерительную камеру и насос сухой воздух (точка росы не выше -50°C) до атмосферного давления. С помощью насоса предварительного разрежения откачивают измерительную камеру до давления запуска. Включают испытуемый насос и регистрируют время откачки измерительной камеры до давления $p=10^{-4}$ Па. Это время должно быть не более 30 мин.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ЛОВУШКИ

12-1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЛОВУШКАМ

Ловушки представляют собой устройства, предназначенные для улавливания паров или газов с целью предотвращения или уменьшения их проникновения из одной части вакуумной системы в другую.

Принцип работы ловушек может быть самым различным: пары масла могут конденсироваться, адсорбироваться, связываться химически, полимеризоваться до твердых частиц, разлагаться до углерода и водорода, сжигаться в токе кислорода и т. д.

Так, при откачке объема парортутным диффузионным насосом, из которого поступают в вакуумную систему пары ртути, имеющие давление насыщения 0,1 Па, для получения более высокого вакуума прибегают к интенсивной их конденсации (вымораживанию) при помощи ловушек с охлаждающими веществами (хладагентами).

При необходимости измерения парциального давления газа или для получения так называемого чистого, безмасляного вакуума при откачке пароструйными масляными насосами применяют ловушки, исключющие или уменьшающие проникновение в вакуумную систему обратного потока паров рабочей жидкости из насоса. Обычно величина обратного потока определяется как масса пара рабочей жидкости, поступающей в откачиваемый объем за единицу времени с единицы поверхности входного отверстия насоса, и выражается в $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

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

Защитная способность ловушки $\beta_{\text{лов}}$ оценивается отношением количеств паров рабочей жидкости, поступающих из насоса в откачиваемый объем в единицу времени с ловушкой и без нее.

Тип ловушек	Наименование ловушки	Принцип действия	Максимальный объем паров рабочей жидкости марки ВМ-5, кг/(м ² ·с)	Применение
Механические	Водоохлаждаемая механическая ловушка Маслоотражатель Фильтр из горючего материала	Уменьшение обратного потока молекул за счет конденсации Каталитическая конденсация паров рабочей жидкости	1,4·10 ⁻⁸ — 1,4·10 ⁻⁹ 2,8·10 ⁻⁷ — 5,6·10 ⁻⁸ 2,8·10 ⁻¹¹ — 1,4·10 ⁻¹⁰	Механическая ловушка применяется обычно с маслоотражателем Чаще всего в виде охлаждаемого водой колышала, устанавливаемого над верхним соплом паромасляного диффузионного насоса В форвакуумных светлах с механическими насосами с масляным уплотнением
Низкотемпературные охлаждаемые	Ловушки с хладагентом Термоэлектрические ловушки	Конденсация паров рабочей жидкости на защитных элементах, охлаждаемых жидким азотом	2,8·10 ⁻¹¹ — 2,8·10 ⁻¹² (2,2—8,3)X X10 ⁻¹¹	В высоковакуумных и сверхвысоковакуумных системах с паромасляными и парортуговыми насосами для надежной защиты откачиваемого объема от паров рабочей жидкости В высоковакуумных системах с паромасляными диффузионными насосами
Адсорбционные	Адсорбционные высоковакуумные Адсорбционные низковакуумные	Избирательная сорбция углеводородов и других высокомолекулярных соединений	2,8·10 ⁻¹² 2,0·10 ⁻¹¹	В высоковакуумных и сверхвысоковакуумных системах с паромасляными диффузионными насосами. Обеспечивают значительно меньшую удельную проводимость по сравнению с механическими и низкотемпературными охлаждаемыми ловушками В форвакуумных системах с механическими насосами с масляным уплотнением
Электрические	Ионные	Образование твердых полимеризованных частиц, осаждающихся на корпусе ловушки	—	В форвакуумных системах с механическими насосами с масляным уплотнением

Часто качественное сравнение ловушек разных типов производят не по отношению к ловушке, а по величине обратного потока паров рабочей жидкости.
Удельная проводимость ловушки $U_{уд.лов}$ представляет собой отношение проводимости ловушки $U_{лов}$ к площади ее входного отверстия A :

$$U_{уд.лов} = \frac{U_{лов}}{A} \quad (12-1)$$

При конструировании ловушек в зависимости от их назначения к ним предъявляется ряд требований, основные из которых перечислены ниже.

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

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

Обычно хорошо сконструированная ловушка имеет $U_{уд.лов}$, равную 3—4 л/(с·см²). Это означает, например, что ловушка с $U_{уд.лов} = 3,5$ л/(с·см²), будучи смонтированной в трубопроводе с диаметром проходного сечения, равным 100 мм, уменьшает быстроту действия насоса, имеющего $S_n = 100$ л/с, примерно на 30%.

3. Ловушки должны иметь конструкцию, обеспечивающую легкий доступ к защитным элементам для их периодической очистки.

4. Ловушки, применяемые в сверхвысоковакуумных системах, должны допускать прогрев до 750 К с целью обезгаживания.

5. Конструкции охлаждаемых ловушек должны обеспечивать малый расход хладагента.

Основные типы ловушек, наиболее широкое применение в вакуумной технике, приведены в табл. 12-1.

12-2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ

Водоохлаждаемые механические ловушки. Во многих случаях при работе с паромасляными диффузионными насосами, использующими рабочие жидкости с достаточно низким давлением насыщенных паров, для уменьшения обратного потока довольствуются тем эффектом, который получается от конденсации молекул на защитных элементах ловушек, охлаждаемых проточной водой. Для конденсации молекулы необходимо, чтобы она столкнулась с защитным элементом ловушки, причем чем ниже температура защитного элемента, тем меньше число столкновений должна претерпеть молекула.

Для осуществления откачки через ловушку защитные элементы располагаются с некоторым зазором друг относительно друга, но таким образом, чтобы создавалась *оптическая плотная* конструкция. В табл. 12-2 приведены наиболее распространенные принципиальные схемы защитных элементов оптически плотных ловушек.

В качестве примера на рис. 12-1 приведена конструкция водоохлаждаемой механической ловушки. Ловушка проста в изготовлении и имеет сравнительно большую удельную проводимость. Защитные элементы этой ловушки выполнены в виде уголков-шевронов

Принципиальные схемы защитных элементов оптически плотных ловушек

Номер схемы	Наименование ловушки	Схема ловушки	Соотношение размеров, обеспечивающих максимальную проводимость и защитную способность	Удельная проводимость, л/(с·см ²)
1	Жалюзийная однорядная		$A/B > 5; \theta = 60^\circ$	4,8
2	Шевронная		$A/B > 5; \theta = 60^\circ$	3,16
3	Жалюзийная двухрядная		$A/B > 5; \theta = 60^\circ$	2,92
4	Коническая кольцевая		$\theta = 60^\circ$	4,5
5	Коническая шевронная		$\theta = 60^\circ$	3,8
6	Кольцевая шевронная		$R/R_0 = 1,3; L/R_0 = 0,75$	2,57
7	Диафрагменная		$L = 3R_0; R/R_0 = 1,1$	1,75

Номер схемы	Наименование ловушки	Схема ловушки	Соотношение размеров, обеспечивающих максимальную проводимость и защитную способность	Удельная проводимость, л/(с·см ²)
8	Диафрагменная бочкообразная		$R/R_0 = 1,5 \sqrt{L - 3a}$ $R/R_0 = 1,3 \sqrt{L/R_0} = 1,5$	4,68 2,69
9	Угловая		$A = B = 3R$	3,27

с углом при вершине 90°, размещенных параллельно друг другу в корпусе (см. схему 2 табл. 12-2). Проводимость ловушки зависит от числа щелей между уголками и возрастает при увеличении числа уголков, так как при той же защитной способности может быть уменьшена высота защитных элементов. При увеличении количества уголков более 10 проводимость возрастает крайне медленно.

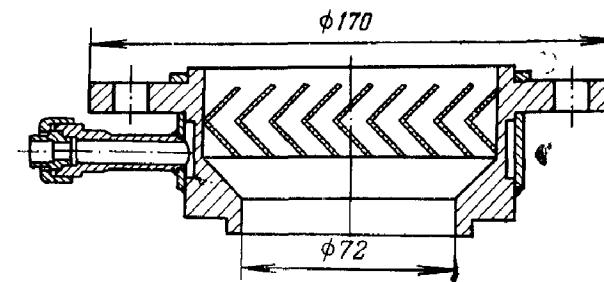


Рис. 12-1. Механическая шевронная ловушка.

Маслоотражатели. На рис. 12-2 изображен маслоотражатель, выполненный в виде охлаждаемого водой колпачка, который служит для предотвращения попадания паров рабочей жидкости, выбрасываемых из струи высоковакуумного сопла пароструйного насоса, в откачиваемый объем.

Колпачок устанавливается над верхним соплом насоса и опускается в глубину струи с таким расчетом, чтобы он пересекал паразитные линии струи пара.

Обычно такие колпачки применяются одновременно с охлаждаемой ловушкой; при этом поток паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объем может быть снижен в 10^2 — 10^3 раз.

Фильтры из пористых материалов. Для уменьшения потока паров рабочей жидкости, проникающих в вакуумную систему из механических вакуумных насосов с масляным уплотнением, в некоторых случаях эффективно использование маслоулавливающих фильт-

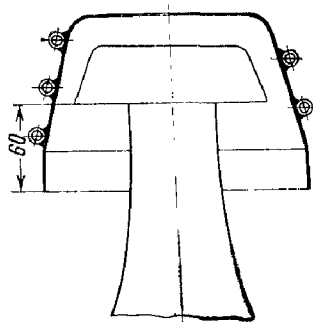


Рис. 12-2. Водоохлаждаемый колпачок, помещаемый над верхним соплом пароструйного насоса.

ров, изготовленных из пористого никеля, фторопласта или нержавеющей стали [98]. Наиболее подходящим материалом для этой цели является пористая нержавеющая сталь с размерами пор (капиллярами) от 4 до 20 мкм.

Механизм улавливания молекул рабочей жидкости заключается в их сорбции на стенках капиллярных каналов ловушки, благодаря чему величина обратного потока паров масла за фильтром из пористой нержавеющей стали уменьшается в 10^6 раз [25].

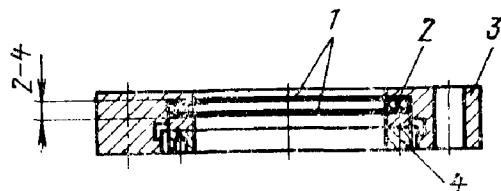


Рис. 12-3. Фильтр из пористого материала.

На рис. 12-3 показан фильтр, представляющий собой съемный элемент, который располагается между откачиваемым объемом и насосом. В фильтре 3 установлены две перегородки 1, изготовленные из пористой нержавеющей стали марки ПНС-10, разделенные прокладкой 2 из маслостойкой резины или фторопласта, которая поджимается гайкой 4. Удельная проводимость перегородки при толщине 0,5 мм составляет $0,02 \text{ л}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Для сохранения необходимой проводимости диаметр перегородок 1 обычно делают вдвое больше диаметра впускного отверстия механического вакуумного насоса.

При длительной работе фильтра в области низких давлений в капиллярах накапливается масло. Поэтому для сохранения эффек-

тивности работы фильтра необходимо периодически производить прокачку газа через него, начиная с атмосферного давления. При этом происходит освобождение пор от масла, и фильтр очищается.

В случае длительной работы фильтра при низких давлениях без прокачки газа его эффективность сохраняется всего 300 ч, после чего его необходимо промыть в органическом растворителе и просушить.

12-3. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОХЛАЖДАЕМЫЕ ЛОВУШКИ

Ловушки с хладагентом. Выше была рассмотрена конструкция механической ловушки, охлаждаемой водой.

Ловушки, охлаждаемые до низких температур, не только более надежно предотвращают проникновение паров рабочей жидкости в откачиваемый объем, но и улавливают пары и газы, имеющиеся в откачиваемом объеме, тем самым снижая давление в нем (см. § 11.6).

В табл. 12-3 приведены давления паров некоторых веществ при различных температурах.

Таблица 12-3

Давление паров двуокиси углерода, воды и ртути при различных температурах охладителей

Охладитель	Температура охладителя, К, при 10^6 Па	Давление насыщенного пара, Па		
		Двуокись углерода	Вода	Ртуть
Проточная вода	288	—	$23,2 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-1}$
Лед	273	—	$6,1 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^{-2}$
Поваренная соль со льдом	255	—	10^3	$3,9 \cdot 10^{-3}$
Фреон-22 при работе охлаждающего агрегата с одной ступенью . .	238	—	30	$9,3 \cdot 10^{-4}$
Хлористый кальций со льдом	225	—	5,2	10^{-4}
Фреон-22 при работе охлаждающего агрегата с двумя ступенями . .	До 200	—	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Смесь твердой углекислоты с ацетоном, эфиром или спиртом . . .	195	$8,9 \cdot 10^1$	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-7}$
Фреон-13 при работе охлаждающего агрегата с двумя и тремя ступенями	До 153	10^3	$1,5 \cdot 10^{-5}$	—
Жидкий кислород	90	$5,3 \cdot 10^{-4}$	10^{-19}	10^{-30}
Жидкий воздух	80	$10,6 \cdot 10^{-5}$	$< 10^{-19}$	$< 10^{-30}$
Жидкий азот	77	$1,10^{-6}$	$< 10^{-19}$	$< 10^{-30}$
Жидкий водород	20	—	$< 10^{-20}$	$< 10^{-30}$

В отечественной промышленности для охлаждения ловушек чаще всего применяют жидкий азот. Для конденсации и вымораживания паров рабочей жидкости в лабораторной практике широко применяются ловушки, изготовленные из стекла [32].

На рис. 12-4 представлена жалюзийная охлаждаемая ловушка, которая используется в большинстве отечественных вакуумных агрегатов.

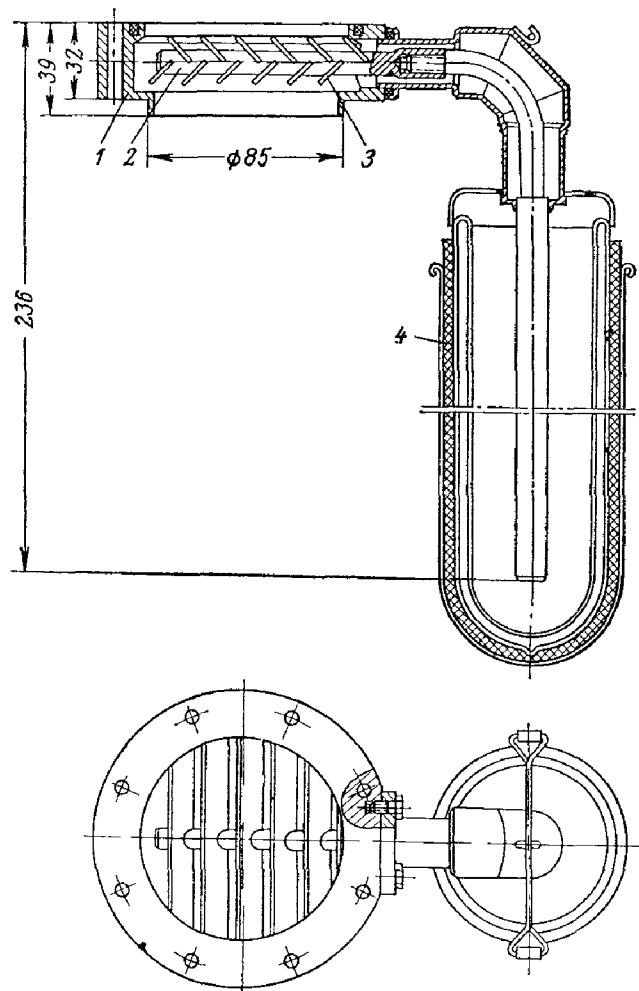


Рис. 12-4 Жалюзийная азотная ловушка
1 — корпус, 2 — медный хладопровод; 3 — медные защитные элементы, 4 — сосуд Дьюара

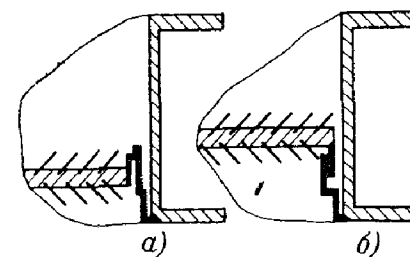
Защитные элементы 3 ловушек этого типа с условным проходом ДУ-85 и ДУ-160 охлаждаются с помощью медного хладопровода 2, конец которого опущен в сосуд Дьюара 4 с жидким азотом.

В ловушках ДУ-260, ДУ-350 и ДУ-500 применяется азотный питатель, который автоматически осуществляет подачу жидкого азота из сосуда Дьюара в полость хладопровода. В табл. 12-4 приведены некоторые технические характеристики этих ловушек.

Расход хладагента в единицу времени в охлаждаемых ловушках зависит от притока тепла, идущего от наружных стенок корпуса ловушки и сопла пароструйного насоса к ее охлаждаемым поверхностям. Существенную роль играет приток тепла в местах соединения охлаждаемых элементов ловушки с ее корпусом.

Снижение расхода хладагента может быть достигнуто путем охлаждения корпуса ловушки водой и постановки водоохлаждаемых

Рис. 12-5. Антимиграционные барьеры.
а — неразборный; б — разборный



экранов между горячим соплом насоса и охлаждаемыми элементами ловушки. Для снижения притока тепла в местах соединения охлаждаемых элементов ловушки с ее корпусом применяют тепловые развязки, выполненные в виде зазоров или переходов из материалов с большим тепловым сопротивлением. Так, например, трубопровод для заливки ловушки хладагентом чаще всего изготавливают из тонкостенной трубки из кобальта или нержавеющей стали.

Таблица 12-4

Технические характеристики ловушек

Наименование характеристики	Типоразмер ловушки				
	ДУ 85	ДУ 160	ДУ 260	ДУ-380	ДУ 500
Проводимость, л/с	133	313	1460	2840	6100
Минимальная температура защитных элементов, К	103	103	103	103	103
Расход жидкого азота в установившемся режиме, л/ч	0,12	0,25	0,9—1	0,9—1	1,3—1,5
Высота корпуса, мм	32	48	72	74	85
Масса, кг	2,1	4,5	9,2	15	24,1

Следует отметить, что через зазоры тепловых развязок может проникать в откачиваемый объем значительное количество паров масла из пароструйного диффузионного насоса. Кроме того, масло может мигрировать непосредственно по внутренней поверхности неохлаждаемой стенки ловушки.

Для исключения попадания масла в откачиваемый объем подобными путями применяют так называемые *антимиграционные барьеры*, две схемы которых показаны на рис. 12-5.

Антимиграционные барьеры практически не снижают проводимость ловушки и достаточно надежно предотвращают миграцию ра-

бочей жидкости в откачиваемый объем при длительной работе ловушки.

В сверхвысоковакуумных системах, в которых используются паромасляные диффузионные насосы, для надежной защиты откачиваемого объема от проникновения паров рабочей жидкости нашли применение прогреваемые двухъярусные жалюзийные ловушки. На рис. 12-6 показана одна из конструкций такой ловушки.

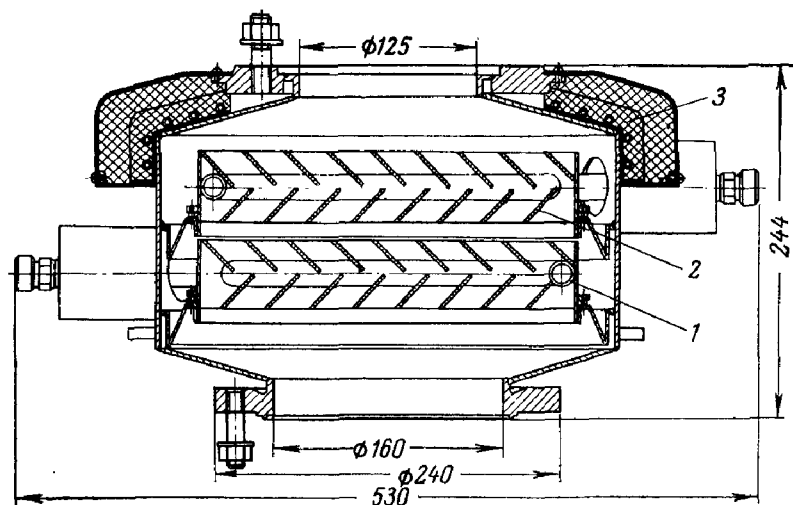


Рис. 12-6. Прогреваемая двухъярусная жалюзийная азотная ловушка.

В корпусе ловушки друг под другом смонтированы два яруса защитных элементов 1 и 2. Верхняя часть ловушки имеет футеровку 3 с нихромовыми нагревателями для прогрева при обезгаживании. Обезгаживание ловушки производится в два этапа: сначала прогревается вся ловушка без подачи азота, затем в нижний ярус 1 подается хладагент, в то время как верхний ярус 2 продолжает прогреваться.

После охлаждения нижнего яруса жидким азотом выключается нагрев верхнего яруса. При работе ловушки жидкий азот подается в оба яруса. Ловушка уплотняется с вакуумной системой и насосом через металлические уплотнители. Применение такой ловушки в агрегате ВА-05-5 дает возможность получить в откачиваемом объеме давление $6,5 \cdot 10^{-7}$ Па.

В отдельных случаях для охлаждения ловушек требуется температура от 230 до 170 К. Например, для защиты механических вакуумных насосов от попадания паров воды достаточно температура 200 К, так как при этом давление паров воды составляет уже примерно $2,6 \cdot 10^{-1}$ Па. Такая температура легко достигается при использовании твердой углекислоты, залитой теплопроводящей жидкостью. В качестве теплопроводящей жидкости применяют ацетон, спирт, эфир или трихлорэтилен.

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

На рис. 12-7 показана принципиальная конструктивная схема ловушки с автономным микроохладителем, работающим по холодильному циклу Мак-Магона с адиабатическим расширением сжатого воздуха без совершения работы [43].

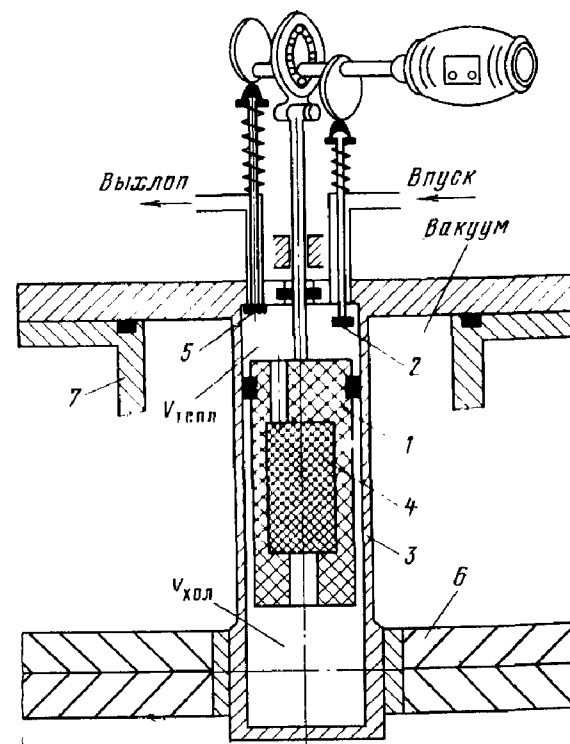


Рис. 12-7. Принципиальная конструктивная схема ловушки с автономным микроохладителем.

1 — поршень-вытеснитель, выполненный из оргстекла; 2 — впускной клапан; 3 — тонкостенный цилиндр из нержавеющей стали; 4 — регенератор-теплообменник; 5 — выпускной клапан; 6 — защитные элементы ловушки; 7 — корпус.

Работа микроохладителя ловушки происходит следующим образом. В тот момент, когда поршень-вытеснитель 1 находится в крайнем нижнем положении, воздух с давлением $(3-6) \cdot 10^5$ Н/м² поступает через впускной клапан 2 в цилиндр 3 и заполняет объем $V_{\text{тепл}}$ над поршнем-вытеснителем. При движении поршня-вытеснителя 1 вверх воздух через регенератор-теплообменник 4 помещается в объем $V_{\text{хол}}$.

Регенератор-теплообменник 4 представляет собой цилиндрическую полость внутри поршня-вытеснителя, заполненную слоями ла-

тушной сетки. Воздух, проходя через регенератор-вытеснитель охлаждается, отдавая тепло холодной насадке регенератора.

При подходе поршня-вытеснителя к крайнему верхнему положению закрывается клапан 2 и открывается выпускной клапан 5. Давление воздуха падает, и вследствие его расширения происходит понижение температуры воздуха. Полученный холод передается головке цилиндра 3, с которым через хороший тепловой контакт соединены защитные элементы 6 ловушки.

Расширяющийся и охлаждающийся воздух проходит через регенератор в обратном направлении и охлаждает насадку регенератора. При движении поршня-вытеснителя 1 вниз оставшийся в холодном объеме отработанный воздух вытесняется через выпускной



Рис. 12-8. Высоковакуумная ловушка с термоэлектрическим охлаждением типа ТВЛ-100-2.

клапан 5 в атмосферу. Затем цикл вновь повторяется. Холодопроизводительность описанного микроохладителя при температуре 173 К составляет примерно 15 Вт при расходе воздуха 2,5 м³/ч и диаметре поршня-вытеснителя 45 мм с ходом 40 мм.

Термоэлектрические ловушки. На базе полупроводниковых термоэлементов разработана ловушка, показанная на рис. 12-8, в которой используется эффект термоэлектрического охлаждения (эффект Пельтье). Основным конструктивным элементом ловушки является термоэлектрическая полупроводниковая батарея, охлаждаемая водой и состоящая из термоэлементов, соединенных электрически последовательно, а термически — параллельно.

Холодные спай батареи несут на себе жалюзийные защитные элементы. Питание ловушки осуществляется постоянным током напряжением 0,9—1,1 В, при этом потребляется мощность около 60 Вт. Температура средних защитных элементов ловушки составляет от 230 до 240 К при давлении в вакуумной системе $1 \cdot 10^{-3}$ Па и отсутствии заметных пульсаций тока источника питания.

Ловушки для высокопроизводительных насосов — разборные. Для очистки больших ловушек предусмотрена возможность извлечения из корпуса термоэлектрических батарей вместе с поверхностями конденсации.

12-4. АДСОРБЦИОННЫЕ ЛОВУШКИ

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

Высокая адсорбционная способность некоторых пористых веществ — адсорбентов (цеолита, активированной окиси алюминия, активированного древесного угля) по отношению к парам масла дает возможность создавать эффективные ловушки [89].

На рис. 12-9 изображена не охлаждаемая адсорбционная ловушка, в которой в качестве адсорбента используется активированный древесный уголь марки БАУ (ГОСТ 6217-52) или уголь СКТ-2 (ТУД2ГУ-939-66). Ловушка представляет собой металлический цилиндр 1, внутри которого вварена трубка 3, предназначенная для нагревателя. Верхний фланец 2 через металлическую прокладку уплотняется с вакуумной системой. К нижнему фланцу через охлаждаемый водой резиновый уплотнитель крепится пароструйный диффузионный насос с быстротой действия 100 л/с.

Первоначальная подготовка ловушки к работе состоит в прогреве адсорбента до температуры 620—700 К в течение 8—10 ч; при этом давление в корпусе ловушки должно быть не выше $(1-4) \times 10^{-3}$ Па. Через 2,5—3 ч после остывания обезгаженной ловушки до комнатной температуры давление в системе достигает $(1-2) \times 10^{-6}$ Па. Применение этих ловушек в системах, откачиваемых паромасляными диффузионными насосами, снижает количество паров рабочей жидкости, проникающих в откачиваемый объем, более

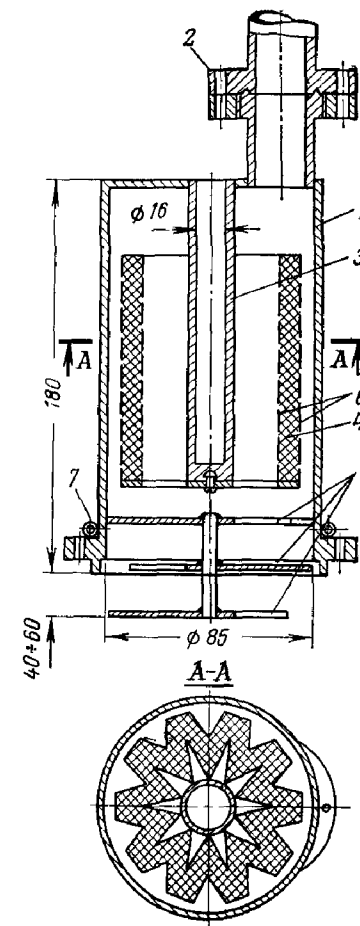


Рис. 12-9. Высоковакуумная адсорбционная ловушка.

1 — корпус; 2 — фланец; 3 — трубка для нагревателя; 4 — адсорбент; 5 — маслоотражательные щитки; 6 — сетка; 7 — трубка.

чем в 100 раз. После кратковременного напуска воздуха в ловушку время повторного обезгаживания адсорбента не превышает 1—1,5 ч.

В ловушке, показанной на рис. 12-10, в качестве адсорбента используется активная окись алюминия А-1 (ГОСТ 8136-56). Втулки 1 из активной окиси алюминия надеты на медные стержни 2, впаянные в охлаждаемые водой стенки корпуса ловушки. Регенера-

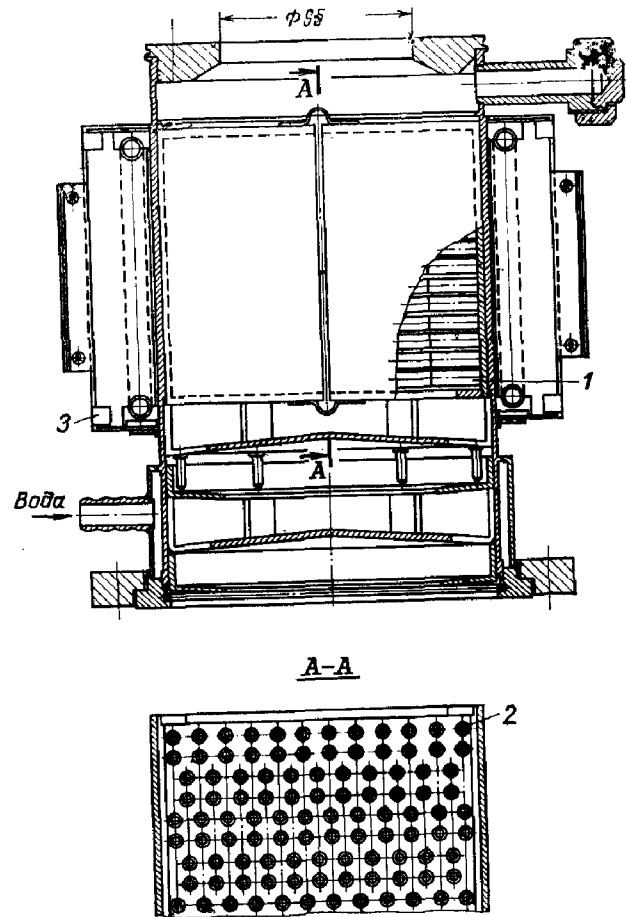


Рис. 12-10. Высоковакуумная адсорбционная ловушка с активной окисью алюминия.

ция ловушки осуществляется путем прогрева до температуры 600 К с помощью нагревателей 3. Вследствие значительной теплопроводности медных стержней 2 резко сокращены затраты времени на нагрев при регенерации и последующее охлаждение. Применение этой ловушки дает возможность получить в откачиваемом объеме давление $6,5 \cdot 10^{-7}$ Па и поддерживать его в течение длительного времени.

Низковакуумные адсорбционные ловушки. При работе механического вакуумного насоса в вакуумную систему поступает значительное количество масла за счет естественного испарения и миграции по внутренней поверхности трубопроводов. Так, скорость обратного потока масла из механических вакуумных насосов составляет от $(8-14) \cdot 10^{-10}$ до $3 \cdot 10^{-8}$ кг/с. Скорость обратного потока масла

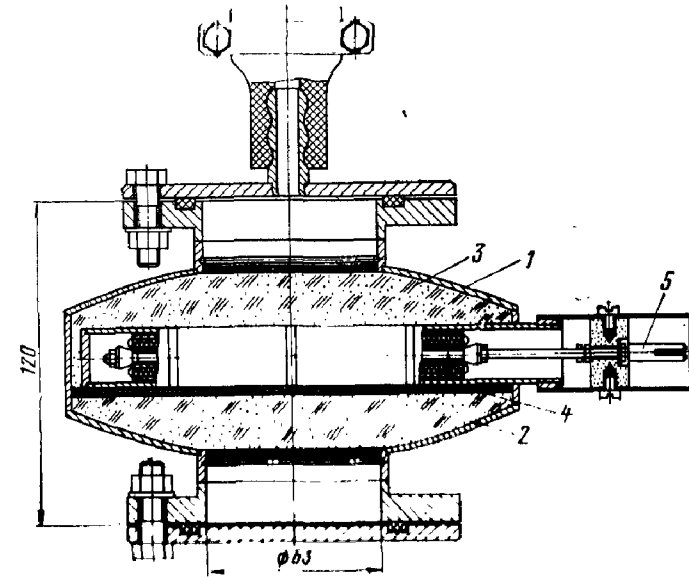


Рис. 12-11. Низковакуумная адсорбционная ловушка.

из двухроторных вакуумных насосов оценивается в $(7,0-8,0) \times 10^{-10}$ кг/с. Отметим, что вылет масла из насоса резко возрастает с уменьшением давления в системе.

Для снижения потока масла из механического вакуумного насоса в отдельных случаях применяют адсорбционные ловушки.

На рис. 12-11 показан чертеж адсорбционной ловушки ЛС1Т-63 для системы предварительной откачки. В корпусе 1 ловушки размещены два слоя адсорбента 2 и 3, разделенные металлической сеткой 4. Адсорбент 2 представляет собой активированный уголь СКТ-2 (ТУД2ГУ-939-66), а адсорбент 3 — цеокар II (ТУ38-10233-71). Адсорбент 2 обладает наибольшей сорбционной емкостью по маслу. Адсорбент 3, хотя и имеет ограниченную емкость по отношению к парам масла, хорошо сорбирует различные углеродсодержащие соединения. Ловушка обеспечивает надежную защиту откачиваемого объема от паров масла в течение не менее 1000 ч, после чего требуется ее регенерация нагревом нагревателя 5 до температуры 570—620 К в течение 2—3 ч при давлении 1 Па.

Следует, однако, заметить, что при откачке через ловушку большого количества воздуха ловушка быстро насыщается в основном парами воды и становится малоэффективной или даже препятствует достижению заданного разрежения. Поэтому целесообразно иметь

дополнительный форвакуумный трубопровод, через который удаляется основная масса газа и объем откачивается до давления 10^2 — 10 Па, минуя ловушку. При этом достаточно эффективная защита от проникновения паров масла из механического вакуумного насоса достигается противотоком газа или воздуха на входе насоса с помощью калиброванной течи. При вязкостном режиме течения подаваемого в систему воздуха или другого газа пролет паров масла из насоса будет незначительным. Затем следует произвести откач-

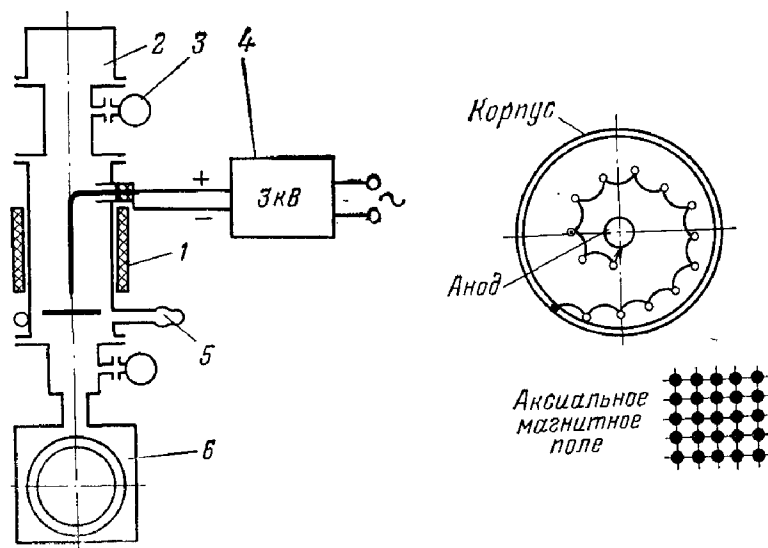


Рис. 12-12. Электрическая (ионная) ловушка.

1 — постоянный магнит; 2 — колпак; 3 — манометрический датчик; 4 — блок питания; 5 — штуцер водяного охлаждения; 6 — механический вакуумный насос; корпус — катод, центральный стержень — анод.

ку объема до заданного давления через адсорбционную ловушку.

Электрические ловушки. При откачке объемов механическими вакуумными насосами с масляным уплотнением наряду с адсорбционными ловушками применяют электрические (ионные) ловушки.

В электрической ловушке инверсно-магнетронного типа (корпус — катод, центральный электрод — анод), схема которой представлена на рис. 12-12, используется электрический разряд.

В результате действия разряда происходит полимеризация проникших в ловушку углеводородов в твердые частицы, которые осаждаются на поверхности катода — корпусе ловушки. Основным условием протекания процесса полимеризации является адсорбция молекул углеводородов на поверхности катода, для чего необходима возможно полная ионизация углеводородов.

В электрической ловушке эффективная ионизация достигается за счет сложной траектории электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях. Напряженность электрического и магнитного полей выбирается таким образом, чтобы протяженность траектории электронов была наибольшей. При этом поток электронов

направляется к аноду, а поток образовавшихся ионов — к катоду.

Во время соударения ионов с холодным катодом (корпусом ловушки) выбиваются новые электроны, которые поддерживают разряд и одновременно обеспечивают эффективное протекание процесса полимеризации.

Спектрометрические исследования, проведенные на вакуумной системе с электрической ловушкой, показали, что парциальное давление паров рабочей жидкости снижается примерно в 100 раз, давление паров воды — в 4 раза, а кислород исчезает практически полностью. Применение ловушки этого типа целесообразно там, где достаточно иметь давление $1,33$ — $0,133$ Па с минимальным количеством углеводородов.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

13-1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ

Требования, которые предъявляются к конструкционным материалам, используемым в вакуумной технике, существенно отличаются от принятых в общем машиностроении и часто вообще не учитываются в иных областях техники.

Рассмотрим основные специфические требования, которым должны удовлетворять материалы, используемые в вакуумной технике.

1. Высокая вакуумная плотность при минимальной толщине материала (см. гл. 4).

2. Низкое давление насыщенных паров материала при рабочей температуре (см. гл. 3).

3. Наименьшее возможное газовыделение в вакууме и легкость обезгаживания (см. гл. 2).

Скорости удельного газовыделения различных материалов при комнатной температуре приведены на рис. 13-1 и 13-2.

Кроме этих основных специфических требований, к материалам, используемым в вакуумной технике, может предъявляться ряд других дополнительных требований по *теплоэлектропроводности, температурным коэффициентам линейного расширения, чистоте исходного материала* и т. д.

Учитывая большое разнообразие конструкционных материалов, используемых в вакуумной технике, и непрерывный прогресс в этой области, ограничимся рассмотрением лишь основных материалов.

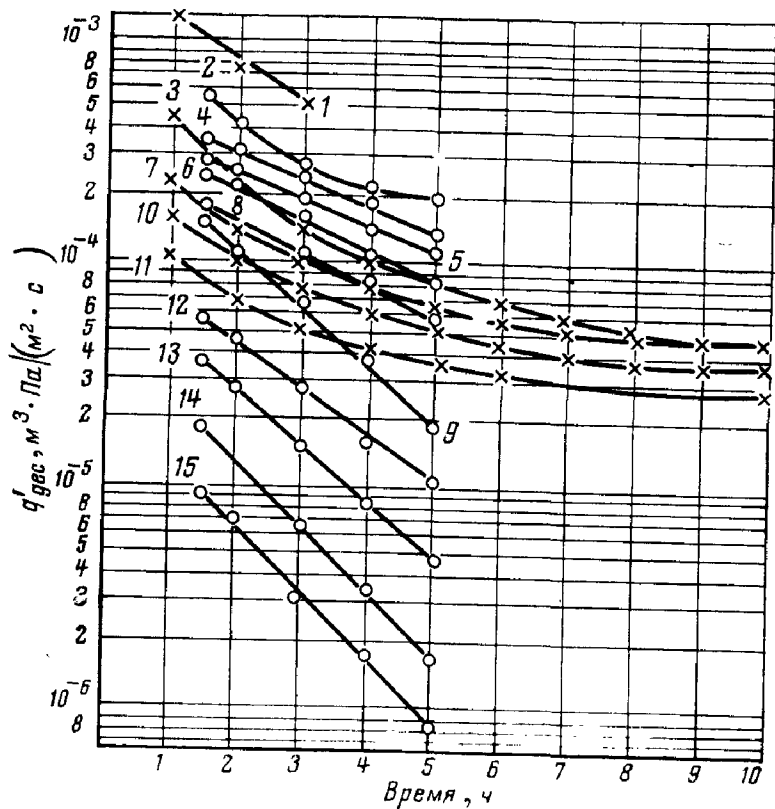


Рис. 13-1. Зависимость скорости удельного газовыделения q' различных металлов от времени откачки при комнатной температуре.

1 — алюминий; 2 — дюралюминий необработанный; 3 — мягкая сталь; 4 — дюралюминий, промытый бензолом и ацетоном; 5 — латунь необработанная; 6 — латунь, промытая бензолом и ацетоном; 7 — дюралюминий; 8 — медь необработанная; 9 — нержавеющая сталь необработанная; 10 — латунь; 11 — нержавеющая сталь; 12 — медь, промытая бензолом и ацетоном; 13 — дюралюминий протравленный, промытый бензолом и ацетоном; 14 — латунь протравленная, промытая бензолом и ацетоном; 15 — медь протравленная, промытая бензолом и ацетоном.

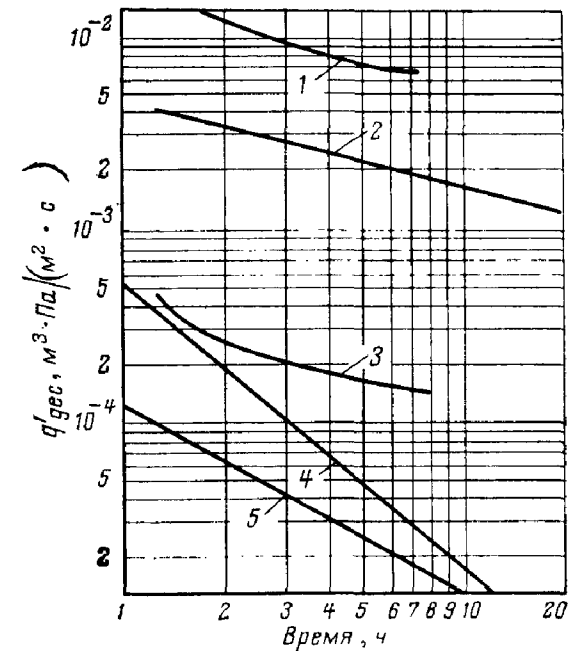


Рис. 13-2. Зависимость скорости удельного газовыделения q' некоторых материалов от времени откачки при комнатной температуре. 1 — нейлон; 2 — органическое стекло; 3 — фторопласт; 4 — пидцин; 5 — стеатит.

13-2. МЕТАЛЛЫ И ИХ СПЛАВЫ

Металлы и их сплавы являются основными конструкционными материалами, из которых изготавливается большинство элементов и узлов современных вакуумных систем.

Малоуглеродистые и углеродистые стали (сталь Ст. 3, сталь 20, сталь 45, сталь 40X и др.) широко используются для изготовления элементов и узлов вакуумных систем с давлением не ниже $1 \cdot 10^{-4}$ Па. Для исключения коррозии стальные детали, как правило, хромируются или никелируются. Эти материалы, как и другие стали с содержанием никеля меньше 8%, нельзя применять при температурах ниже 223 К из-за повышенной хрупкости при низких температурах.

Нержавеющие стали (сталь 2X13, 12X18H10T и др.) являются основным материалом, из которого изготавливаются высоковакуумные и сверхвысоковакуумные системы. Эти стали обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошо обезгаживаются прогревом, превосходно свариваются аргонодуговой и электронно-лучевой сварками, паяются мягкими и твердыми припоями и обычно применяются при температуре не выше 1200 К.

Медь (М1, МВ) является основным материалом для изготовления корпусов многих типов электровакуумных приборов, уплотнительных элементов коммутирующей аппаратуры, теплообменников, токовводов и т. п. Медь обладает высокой вакуумной плотностью.

Латунь (Л63, ЛС59-1) в вакуумной технике имеет ограниченное применение из-за летучих примесей, главным образом цинка, который при нагревании латуни легко испаряется, в результате чего латунь становится пористой.

Алюминий (АД-1) и его сплавы часто используются для изготовления внутренних элементов пароструйных насосов, а также для уплотнителей в разборных соединениях.

Ковар (железоникелькобальтовый сплав), имеющий температурный коэффициент линейного расширения $(43-53) \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$, весьма близкий к коэффициентам термического расширения некоторых сортов стекла, применяется главным образом для спаев стекла с металлом. Ковар имеет низкую теплопроводность и часто используется для изготовления тепловых развязок.

Вольфрам ($t_{пл} = 3670 \text{ K}$) из всех металлов имеет самую высокую температуру плавления и самое низкое давление паров и применяется при температурах до 2800 K . Поэтому из вольфрама чаще всего изготавливают нагревательные элементы. Недостатками вольфрама следует считать его хрупкость и трудность его механической обработки.

Молибден ($t_{пл} = 2900 \text{ K}$) менее хрупок, чем вольфрам, и, будучи также тугоплавким материалом, идет на изготовление нагревателей, тепловых экранов и для спая с некоторыми сортами стекла. Наибольшая рабочая температура в вакууме достигает 2000 K .

Никель ($t_{пл} = 1726 \text{ K}$) и некоторые его сплавы часто применяются для изготовления сложных паяных узлов и экранов.

Наиболее важные вакуумно-технические характеристики основных металлов, применяемых в вакуумной технике, приведены на рис. 13-1 и в приложениях 2—11.

13.3. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

К этой группе материалов относятся главным образом стекло, керамика, резина и некоторые синтетические материалы. Величины скорости удельного газовыделения из ряда неметаллических материалов показаны на рис. 13-2.

Стекло. Стекло обладает многими положительными свойствами, которые сделали его одним из самых распространенных материалов. Важнейшими свойствами стекла, выгодно отличающими его от других материалов, являются прозрачность, хорошие электроизолирующие свойства, способность принимать и сохранять любую сложную форму, простота вакуумно-плотного соединения стеклянных деталей друг с другом и с металлом; стекло в обычных условиях практически непроницаемо для большинства газов (кроме гелия). По температурным коэффициентам линейного расширения (ТКЛР) стекла различных составов образуют две группы.

Легкоплавкие стекла (С90-1, С88-1) имеют ТКЛР $(60-100) \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$ и относительно низкую температуру размягчения $770-850 \text{ K}$. Легкоплавкие стекла применяются главным образом для изготовления неответственных элементов (стеклянных лопушек, колб, плоских ножек и т. п.) и спаиваются с металлами на основе железа.

Тугоплавкие стекла (С39-1, С40-1 и др.) имеют ТКЛР $(34-55) \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$ и температуру размягчения $770-1100 \text{ K}$. Эти

стекла обладают высокими диэлектрическими свойствами и термостойкостью. Механическая прочность их выше, чем у легкоплавких стекол. Поэтому тугоплавкие стекла применяют для изготовления электрических тоководов, иллюминаторов высоковакуумных систем, ножек электровакуумных приборов и т. п.

По спаиваемости с металлами тугоплавкие стекла делятся на молибденовые (С47-46, С48-1, С49-3) и вольфрамовые (С39-1, С40-1 и др.).

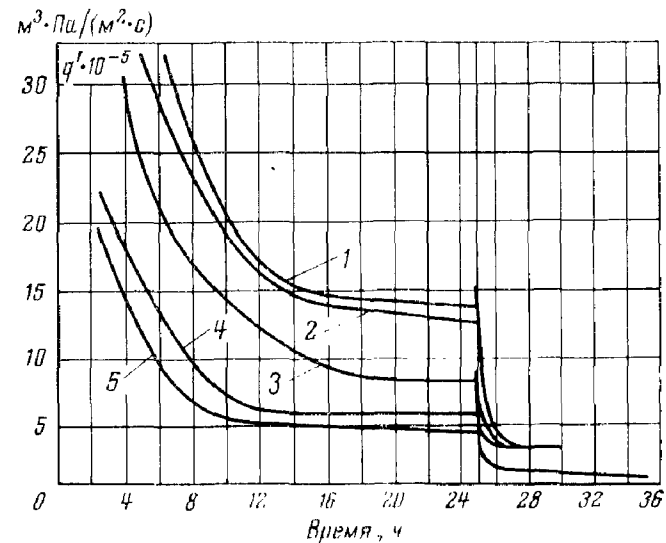


Рис. 13-3. Зависимость скорости удельного газовыделения q' резины различных марок от времени их прогрева.

1 — резина 1015 при 353 K ; 2 — резина 9024 при 353 K ; 3 — резина 14Р-23 при 473 K ; 4 — резина 14Р-2 при 423 K ; 5 — резина 7889 при 343 K ; вертикальной чертой на кривых отмечено время снижения температуры до 293 K .

Молибденовые стекла хорошо спаиваются с молибденом и коваром. Вольфрамовые стекла отличаются более высокой химической стойкостью и применяются для изготовления ответственных деталей, работающих при высоких температурах.

Кварцевое стекло отличается от обеих групп стекла тугоплавкостью (температура начала размягчения 1520 K) и малым ТКЛР.

Существенным недостатком кварцевого стекла является заметная проницаемость гелия даже при комнатной температуре, причем с ростом температуры проницаемость гелия интенсивно увеличивается [29].

Керамика. В сверхвысоковакуумных системах и в мощных высоковольтных вакуумных приборах в качестве изоляторов применяют керамику. Керамические изоляторы механически прочны, обладают высоким электрическим сопротивлением, большой теплостойкостью и способны образовывать вакуумно-плотные соединения с некоторыми металлами и сплавами.

Физико-механические свойства резин

Таблица 13-1

Показатели	Единица измерения	Марки резины				
		7889	9024	51-1578	51-1433	ИРП-1345
Тип каучука	—	НК	СКФ-26	СКФ-26	СКФ-26	СКФ-26
Предел прочности на разрыв	Н/мм ²	17·10 ⁶	10 ⁷	8·10 ⁶	—	10 ⁷
Относительное удлинение при разрыве	%	550	350	180	—	160
Остаточное удлинение при разрыве	%	20	17	—	—	10
Твердость по твердому ТШМ-2	Н/мм ²	(4,5—7,5)·10 ⁵	(7—11)·10 ⁵	(7—11)·10 ⁵	—	—
Условно равновесный модуль E	Н/мм ²	24·10 ⁵	45·10 ⁵	—	—	—
Минимальная рабочая температура в вакууме	К	243	240	250	—	7·10 ⁶
Максимальная рабочая температура в вакууме	К	350	360	470	220	240
Стойкость по отношению к маслу и бензину	—	Нестойкая	Маслостойкая	Маслостойкая	Маслостойкая	Маслостойкая
Удельный поток газовой выделенной при максимальной рабочей температуре	мл ³ ·Па/(м ² ·с)	5,3·10 ⁻⁵	2,7·10 ⁻⁵	5,2·10 ⁻⁴ 7,8·10 ^{-7*}	1,9·10 ⁻⁴	2,7·10 ⁻⁴
Характеристика продуктов газовой выделенной (твердые, жидкие, газообразные)	—	ТВ, Ж, Г	ТВ, Ж, Г	ТВ, Г	Ж, Г	Г
Газопроницаемость при 10 ⁵ Па и температуре 298 К:	мл ³ ·Па/(м ² ·с)	—	—	—	—	—
по азоту	—	—	—	—	—	—
по кислороду	—	—	—	—	—	—
по водороду	—	—	—	—	—	—
по гелию	—	—	—	—	—	—

* После обезгаживания.

** При 373 К.

Для изготовления металлокерамических изоляторов чаще всего используют алюмооксидную (22ХС, М7), стеатитовую (К-1, ЛК-1) или форстеритовую (ЛФ-11, КВФ-4) керамику.

Вакуумная резина. Вакуумные резины нашли широкое применение главным образом в качестве уплотнителей в разъемных соединениях и в вакуумных вводах движения.

Уплотнители для вакуумных систем изготавливаются из резин марок 7889, 9024, 51-1578, 51-1433 и др. Одной из важнейших характеристик вакуумных резин является их проницаемость (табл. 13-1).

Таблица 13-2

Скорость удельного газовой выделенной $q'_{\text{дес}}$ из некоторых неметаллических материалов

Материал	$q'_{\text{дес}}$, мл ³ ·Па/(м ² ·с)	Примечание
Пластмассы	$1,2 \cdot 10^{-1} - 4 \cdot 10^{-3}$	После обезгаживания при 520 К в течение 120 ч и охлаждения до 430 К
Компаунды	$3,3 \cdot 10^{-1}$	
Пресс-материалы (например, АГ-4С)	$1,5 \cdot 10^{-1}$	То же
Клеи на основе формальдегидных смол (например, БФ-4)	$1 \cdot 10^{-1}$	
Лаки (например, МЛ-92)	$1,5 \cdot 10^{-1}$	" "
Провода (марок ПЭНТ-имидный, ПЭТВ, ЦЭФ)	$5 \cdot 10^{-1*}$	" "
Керамика (например, 22ХС)	$4 \cdot 10^{-6}$	После обезгаживания при 670 К в течение 72 ч и охлаждения до 293 К
Стекло известково-натриевое	$1,5 \cdot 10^{-3}$	После выдержки в вакууме при 470 К в течение 2 ч
	$2 \cdot 10^{-2}$	После выдержки в вакууме при 720 К в течение 2 ч
	$1,5 \cdot 10^{-6} - 1,5 \cdot 10^{-5}$	После остывания до 293 К

* Скорость удельного газовой выделенной отнесена к 1 м длины.

Наибольшей проницаемостью из газов обладает водород, затем в порядке уменьшения следуют гелий, кислород и азот. Кроме перечисленных выше газов, резины проницаемы для паров многих растворителей (бензол, бензин, этиловый эфир, толуол и др.), а также для сложных газов (аммиак, этан, хлористый водород).

При прогреве в вакууме из резины выделяются газообразные, жидкие и твердые продукты, причем скорость выделения этих продуктов увеличивается с возрастанием температуры.

При длительном прогреве резины в вакууме и последующем охлаждении до комнатной температуры скорость газовыделения уменьшается и достигает мало меняющейся величины (рис 13.3)

Резиновые уплотнители часто вырезаются из пластин (ТУ38 105116 70) или склеиваются из шнура прямоугольного или круглого сечения (ТУ38-105108 70), однако наилучшие результаты получаются при непосредственном формовании резиновой смеси и последующей вулканизации в пресс формах

Пластмассы. Фторопласт 4 обладает широким рабочим температурным диапазоном (от 180 до 520 К) и малым собственным газовыделением (примерно в 10 раз меньше, чем у лучших сортов вакуумной резины)

Однако фторопласт 4 имеет малую упругость и большую остаточную деформацию и текучесть, которые возрастают с увеличением температуры и давления. Кроме того, при температуре выше 520 К из фторопласта начинает выделяться фтор

При изготовлении из фторопласта 4 уплотнительных прокладок необходимо, чтобы зазоры в стыках разъемного соединения не превышали 0,1 мм, с тем чтобы предотвратить его вытекание

Сжатие фторопластового уплотнителя целесообразно осуществлять с постоянным поджимом, причем усилие сжатия уплотнителя должно быть не более $30 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.

Из за высоких диэлектрических свойств, не зависящих от частоты приложенного напряжения и мало зависящих от температуры, фторопласт чаще всего используют для изготовления вакуумно-плотных электрических вводов

Скорости удельного газовыделения из некоторых неметаллических материалов приведены в табл 13-2

13.4. РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Рабочие жидкости для механических вакуумных насосов В качестве рабочих жидкостей механических насосов, как правило, используют минеральные масла марок ВМ 4 и ВМ 6 (табл 13-3).

Рабочие жидкости для пароструйных насосов К рабочим жидкостям для пароструйных вакуумных насосов предъявляются следующие основные требования

1 Низкое давление насыщенного пара при комнатной температуре

2 Высокое давление пара при рабочей температуре в испарителе, что обеспечивает работу насоса при относительно высоких выпускных давлениях

3 Однородность состава, так как любое изменение состава жидкости из за улетучивания отдельных компонентов вызовет изменение характеристик насоса

4 Термическая стабильность при рабочей температуре в испарителе насоса и термоокислительная устойчивость

5 Малая химическая активность по отношению к конструкционным материалам

6 Малая удельная теплота парообразования для уменьшения затрат мощности на создание требуемого количества пара в насосе

7 Малая способность к растворению газов, что обеспечивает получение низких остаточных давлений благодаря малому обратному выделению газов струей пара на впуске насоса

Рассмотрим основные свойства ртути, вакуумных масел и эфиров, чаще всего используемых в качестве рабочих жидкостей

Ртуть обладает следующими преимуществами в качестве рабочей жидкости однородностью состава, стабильностью характеристик (так как ртуть как химический элемент не подвержена термическому разложению) и термоокислительной устойчивостью, высоким давлением насыщенного пара при рабочей температуре в испарителе и сравнительно малой способностью растворять газы. Кроме того, поскольку ртуть практически не смачивает некоторые чистые металлические поверхности, зазоры между корпусом и последними соплами насоса могут быть сделаны сравнительно большими

Недостатками ртути являются высокое давление насыщенного пара при комнатной температуре (10^{-1} Па), в связи с чем для получения более низких остаточных давлений между насосом и откачиваемым сосудом необходимо устанавливать охлаждаемую ловушку. Наконец, токсичность паров, приводящая к необходимости оборудовать специальные помещения для работы со ртутью и строго соблюдать меры предосторожности, исключающие высокую концентрацию паров ртути в рабочих помещениях. Токсичность паров ртути

Таблица 13.3

Физико-химические характеристики масел для механических вакуумных насосов с масляным уплотнением

Марка масла	Давление пара при 293 К, Па	Вязкость кинематическая при 323 К $10^6 \text{ м}^2/\text{с}$
ВМ-4*	$6,6 \cdot 10^{-4} - 1,3 \cdot 10^{-3}$	47—57
ВМ 6**	$1,3 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-5}$	30—40

* ГОСТ 7903 56

** МРТУ 38 1 261 68

Дистиллятное с узким фракционным составом не содержит легколетучих примесей, обладает пологой температурной зависимостью вязкости, превосходит масло ВМ 4 в несколько раз по окислительной стабильности

Таблица 13.4

Физико-химические характеристики масел для бустерных насосов

Марка	Молекулярная масса	Плотность кг/м^3	Давление пара при 293 К, Па	Вязкость кинематическая при 323 К $10^6 \text{ м}^2/\text{с}$	Теплота парообразования кДж/г моля
ВМ 3*	—	850	$1,3 \cdot 10^{-2} - 1,3 \cdot 10^{-3}$	7—10	$1,13 \cdot 10^5$
Г**	350	850	$6,6 \cdot 10^{-3} - 1,3 \cdot 10^{-4}$	12,5—15,3	$1 \cdot 10^5$

* МРТУ 38 1 261 68. Срок службы в высокопроизводительных насосах небольшой из за быстрого окисления кислородом воздуха

** ГОСТ 9184 75. Аналогично эксплуатационным свойствам масла ВМ 3

Физико-химические характеристики масел для паромасляных диффузионных насосов

Марка масла	Молекулярная масса	Плотность, кг/м ³	Давление пара при 293 К, Па	Предельное остаточное давление пароструйного насоса Па	Вязкость кинематическая при 323 К, 10 ⁶ м ² /с	Теплота парообразования, кДж/кг-моль	Примечание
<i>Минеральные</i>							
ВМ-1	450	870	5,3 · 10 ⁻⁶ — —2,6 · 10 ⁻⁷	2,7 · 10 ⁻⁴	65—69	1,15 · 10 ⁵	ГОСТ 5.671-70 По мере работы предельное давление насоса уменьшается. При попадании воздуха в горячий насос масло быстро окисляется и ухудшает характеристики насоса МРТУ 38-261-68 Масло узкого фракционного состава ВТУМЗ-17-62 По сравнению с маслом ВМ-1 обладает более высокой окислительной стабильностью
ВМ-5	450	870	1,3 · 10 ⁻⁶ — —1,3 · 10 ⁻⁷	1,3 · 10 ⁻⁶	—	—	
ВМ-7	—	—	≤4 · 10 ⁻⁶	1,3 · 10 ⁻⁴	80—95	—	
<i>Сложные эфиры</i>							
Продукт ОС	426	910	≤2,7 · 10 ⁻⁶	1,3 · 10 ⁻⁴	8,5	—	ТУЛП-172-65 Неустойчив к воздействию паров воды; в металлических насосах быстро выходит из строя
<i>Продолжение табл. 13-5</i>							
Марка масла	Молекулярная масса	Плотность, кг/м ³	Давление пара при 293 К, Па	Предельное остаточное давление пароструйного насоса, Па	Вязкость кинематическая при 323 К, 10 ⁶ м ² /с	Теплота парообразования, кДж/кг-моль	Примечание
Продукт ОФ	390	980	1,3 · 10 ⁻⁵	≤1,3 · 10 ⁻⁴	—	—	ТУЛП-172-65 Аналогично эксплуатационным свойствам продукта ОС
5Ф4Э	446	1200	1,3 · 10 ⁻⁹	≤9,3 · 10 ⁻⁷	130	—	ТУ 609-447-70
<i>Кремнийорганические</i>							
ПЭС-В-1 (ВКЖ-94А)	700	970	≤6,6 · 10 ⁻⁵	2,7 · 10 ⁻⁴	16—33	1,19 · 10 ⁵	ГОСТ 16480-70 По сравнению с маслом ВМ-1 обладает более высокой окислительной стабильностью
ПЭС-В-2 (ВКЖ-94Б)	700	970	1,3 · 10 ⁻⁶ — —1,3 · 10 ⁻⁴	4 · 10 ⁻⁴ — —1,3 · 10 ⁻³	16—33	—	ГОСТ 16480-70
ПФМС-2/5л	700	1050—1070	6,6 · 10 ⁻⁷ — —9 · 10 ⁻⁵	2,7 · 10 ⁻⁴	8—13	1,24 · 10 ⁵	РТУ 6-02-717-73
ФМ-1	546,9	1096	1,3 · 10 ⁻⁸	1,3 · 10 ⁻⁷ — —1,10 ⁻⁶	35—37	—	ТУ 11-134-69 Характеризуется очень высокой воздухоустойчивостью. При многократном контакте горячего масла с атмосферой не ухудшает характеристики насоса

ти привела к почти полному отказу в промышленности от ее использования в качестве рабочей жидкости для пароструйных насосов.

Масла, используемые в качестве рабочей жидкости для пароструйных насосов, обладают по сравнению со ртутью следующими важными преимуществами: низким давлением насыщенных паров при комнатной температуре, что позволяет получать остаточное давление не выше $5 \cdot 10^{-4}$ Па без использования низкотемпературных ловушек, химической инертностью и, как правило, отсутствием токсичности. Это обусловило широкий переход к маслам в качестве рабочей жидкости, несмотря на то, что многие масла неоднородны по фракционному составу, чувствительны к перегревам, склонны к образованию летучих фракций и окислению, имеют значительную по сравнению со ртутью газопоглотительную способность.

Все масла в той или иной мере разлагаются при рабочей температуре в кипятильнике насоса и поэтому имеют ограниченный срок службы.

Кремнийорганические масла представляют собой соединения, молекулы которых состоят из чередующихся атомов кремния и кислорода с присоединенными углеводородными радикалами по свободным связям кремния. Благодаря сильной связи между кремнием и кислородом они обладают высокой термической и термоокислительной устойчивостью, в связи с чем попадание в горячий насос на непродолжительное время атмосферного воздуха не приводит к порче масла.

Используемые в отечественных паромасляных диффузионных насосах масла ПЭС-В-1 и ПЭС В-2 являются узкими фракциями этилполисилоксановых жидкостей. Масла ПФМС-1 (для бустерных), ФМ-1 и ПФМС-2/5л (для диффузионных насосов) представляют собой полифенилметилсилоксановые жидкости.

Эфиры, используемые в качестве рабочих жидкостей для паромасляных насосов, представляют собой сложные продукты синтеза фталевой и себаценовой кислот с высшими спиртами, а также полифениловые соединения. Эти жидкости являются индивидуальными веществами и поэтому однородны по составу, что позволяет получать в насосах предельные остаточные давления около 10^{-5} — 10^{-6} Па и ниже.

Основные характеристики рабочих жидкостей вакуумных насосов приведены в табл. 13-4, 13-5.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

14-1. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Наиболее важной характеристикой газовой среды в вакуумной технике является *плотность*, или *молекулярная концентрация газа*. Эта величина определяет

теплоперенос, сорбционно-десорбционные процессы, воздействие газа на элементы электронных приборов и другие явления. Однако традиционно состояние газа оценивается давлением, хотя это понятие для вакуумной техники утратило свой смысл, так как почти нет таких процессов в вакуумной технике, которые определялись бы газовым давлением как усилием на единицу поверхности.

Как следует из (1-16), между давлением газа p и молекулярной концентрацией N_1 существует связь:

$$\frac{p}{N_1} = kT, \quad (14-1)$$

где T — абсолютная температура; k — постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ м³·Па/К.

Давление разреженного газа измеряется в паскалях. Соотношения между паскалями, другими единицами давления, употреблявшимися ранее, и молекулярной концентрацией N_1 приведены в табл. 14-1.

Таблица 14-1

Соотношения между единицами давления и молекулярной концентрацией газа N при 293 К

Единицы	Па (Н/м ²)	мм рт. ст. (тор)	ат	бар	N_1 , м ⁻³
Па	1	$0,75 \cdot 10^{-2}$	$0,99 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$2,47 \cdot 10^{20}$
мм рт. ст. (тор)	133,32	1	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$3,29 \cdot 10^{22}$
ат	$1,01 \cdot 10^5$	760	1	1,01	$2,50 \cdot 10^{25}$
бар	$1,00 \cdot 10^5$	750	0,99	1	$2,47 \cdot 10^{25}$

Приборы для измерения давления газа ниже атмосферного называются *вакуумметрами*. Большинство вакуумметров состоит из двух элементов: манометрического преобразователя сигнала давления в электрический сигнал и измерительного блока. В литературе и практике употребляется также термин *манометр*, применяемый к преобразователю, хотя смысл этого понятия значительно более широк — это может быть и вакуумметр, и прибор, измеряющий давление выше атмосферного.

Основные характеристики вакуумметров

По принципу действия вакуумметры можно свести в следующие классы:

1) жидкостные вакуумметры, непосредственно измеряющие давление (U-образные вакуумметры и их модификации);

2) компрессионные вакуумметры, действие которых основано на законе изотермического сжатия идеального газа (манометры Мак-Леода);

3) деформационные вакуумметры, использующие в качестве чувствительного элемента сильфон, мембрану и т. п.;

4) тепловые вакуумметры, использующие зависимость теплопроводности газа от давления; эти приборы подразделяются на термопарные и вакуумметры сопротивления;

5) ионизационные вакуумметры, в которых используется ионизация газа; большая группа приборов этого класса подразделяется в свою очередь на:

электронные ионизационные, ионизация газа в которых осуществляется потоком электронов, эмиттируемых термокатодом;



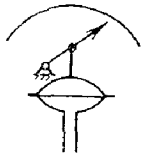
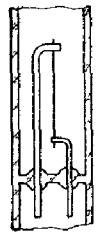
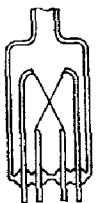
электроразрядные, в которых ток разряда возникает при низких давлениях под действием электрического и магнитного полей;

радиоизотопные, ионизация газа в которых осуществляется потоком α -частиц, образующихся при радиоактивном распаде.

В табл. 14-2 приведены основные характеристики вакуумметров и область их применения

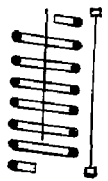
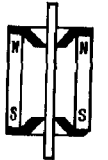
Всю группу вакуумметров можно также разделить на приборы *прямого* и *косвенного* действия. Вакуумметрами прямого действия являются приборы, которые непосредственно реагируют на давление газа. Метрические свойства этих вакуумметров можно заранее рассчитать или получить с помощью градуировки по динамометрическим приборам. Отсчет давления вакуумметрами прямого действия принципиально не зависит от состава газа и его температуры. Эти приборы перекрывают диапазон 10^5 — 10^{-3} Па, причем их относительная погрешность тем меньше, чем выше давление. К вакуумметрам прямого действия относятся жидкостные, компрессионные и деформационные.

Вакуумметры косвенного действия измеряют не само давление, а параметр среды, являющийся функцией

Тип вакуумметра	Принципиальное устройство	Диапазон измерений, Па	Применение
Жидкостные		10 — 10^5	Лабораторная практика, метрология
Компрессионные		10^{-3} — 10^3	Вакуумная метрология
Деформационные		1 — 10^5	Низковакуумное оборудование
Тепловые сопротивления		10^{-1} — 10^5	Вакуумные сушилка и металлургия. Централизованные форвакуумные системы
Тепловые термопарные		10^{-1} — 10^3	Контроль давления в форвакуумных системах

давления, и, как правило, состоят из манометрического преобразователя и радиотехнического измерительного блока. Отсчет давления (выходной сигнал) у вакуумметров косвенного действия зависит от рода газа и его температуры. Вакуумметры косвенного действия способны измерять давления от 10^{-11} Па до атмосферного. К вакуумметрам косвенного действия относятся тепловые и ионизационные приборы.

Продолжение табл. 14-2

Тип вакуумметра	Принципиальное устройство	Диапазон измерений, Па	Применение
Электронные ионизационные		$10^{-8} - 10^2$	Электривакуумное производство. Лабораторная практика
Магнитные электро-разрядные		$10^{-10} - 10^2$	Металлургия сверхчистых металлов. Автоматизированные системы высокого и сверхвысокого вакуума

В производственных условиях преимущественно используются вакуумметры косвенного действия, которые практически безынерционны, охватывают широкий диапазон давлений и просты в эксплуатации.

Для удобства контроля давления в широком диапазоне электроразрядные и электронные ионизационные вакуумметры оснащаются обзорными шкалами с распределением отсчетов, близким к логарифмическому. При этом легко осуществляются запись давления и использование сигнала от вакуумметра для управления с помощью ЭВМ. Большинство промышленных вакуумметров имеет выход аналогового сигнала давления, изменяющегося от 0 до 10 В и рассчитанного на нагрузку не менее 2 кОм. Аналоговый сигнал может быть использован для ввода в ЭВМ, управления программными устройствами блокировки и записи.

Некоторые типы вакуумметров (блокировочные), помимо измерения давления, способны сами производить

управление каким-либо процессом по давлению. Блокировка чаще всего осуществляется по двум точкам, что исключает возможность многократного срабатывания по ложным сигналам. Выбранные значения давления срабатывания можно сблизать в одну точку или разводить до крайних значений диапазона. Во всех блокировочных вакуумметрах разрывная мощность контактов реле не превышает 50 Вт для цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой 2 Гн и 500 Вт для цепей переменного тока (220 В, 50 Гц). При необходимости коммутирования цепей с большими токами блокировочные реле вакуумметров используются как промежуточные, управляющие внешним, более мощным реле.

В вакуумном машиностроении применяются нормализованные конструкции присоединительных элементов манометрических преобразователей. Все прогреваемые манометрические преобразователи (кроме ПММ-28) монтируются на стандартном манометрическом фланце ДУ-50. Электродная система преобразователя монтируется на фланце, имеющем выступ. Преобразователи на фланце ДУ-50 с металлическим уплотнителем выдерживают прогрев до 700 К.

14-2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВАКУУММЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Измерение вакуума, т. е. состояния сильно разреженной газовой атмосферы, постоянно взаимодействующей со стенками камеры, имеет ряд особенностей, соблюдение которых может привести к значительным дополнительным погрешностям.

Подсоединение преобразователей к вакуумной системе. Тепловые преобразователи должны устанавливаться по возможности вдали от источников тепла с тем, чтобы температура баллона преобразователя была в пределах 288—298 К.

Допускается работа преобразователей во внешних магнитных полях с напряженностью не более 0,015 А/м. Если напряженность магнитного поля превышает это значение, то электронные ионизационные манометрические преобразователи необходимо защитить экраном из ферромагнитных материалов.

Магнитные электроразрядные манометрические преобразователи необходимо устанавливать на вакуумной

системе так, чтобы магнит преобразователя был удален от ферромагнитных тел на расстояние не менее 0,2 м.

Применяемое уплотнение не должно давать потоков газовой выделения или диффузии через него, которые могут исказить отсчет давления в обследуемой системе. В диапазоне высокого вакуума предпочтительны, а сверхвысокого — обязательны применение металлического уплотнителя или напайка стеклянного преобразователя на систему. Во всех случаях требуется проверка герметичности соединения преобразователя с системой.

Отсчет давления. Шкалы вакуумметров отградуированы в единицах давления, относительных или электрических единицах. В последних случаях к вакуумметрам прилагается градуировочная кривая или указывается их чувствительность по давлению. Метрические характеристики вакуумметров косвенного действия приведены для азота (сухого воздуха). При измерении давления других газов следует пользоваться градуировочными кривыми по этим газам или соответствующими пересчетными коэффициентами относительной чувствительности. Давление газа в системе

$$p_m = p_{изм} / \alpha_r, \quad (14-2)$$

где α_r — относительная чувствительность; p_m — давление газа в полости манометрического преобразователя; $p_{изм}$ — отсчет давления вакуумметром.

В приложении 12 приведены значения относительной чувствительности α_r некоторых манометрических преобразователей.

Очистка и обезгаживание преобразователей. На работу преобразователей и достоверность измерения ими давления резко влияет малейшая загрязненность прибора.

Загрязнение изоляторов преобразователя шунтирует входную цепь усилителя, занижая показания давления. Эти загрязнения могут иметь место как со стороны вакуумной полости, так и с атмосферной стороны.

Загрязнения, шунтирующие изолятор изнутри, часто удается разрушить высокочастотным разрядом, используя для этой цели искровой течеискатель. Иногда причиной неожиданных утечек по изоляторам сверхвысоковакуумных преобразователей является повышенная влажность в помещении.

В газовой атмосфере вакуумных установок всегда присутствуют в большем или меньшем количестве легко конденсирующиеся высокомолекулярные соединения. Особенно это характерно для установок, работающих в диапазоне низкого и среднего вакуума. Эти соединения загрязняют электроды манометрического преобразователя и со временем искажают его метрические характеристики.

Возможна защита преобразователей от паров масел и других конденсирующихся веществ с помощью вымораживающей ловушки (см. гл. 13). При этом вакуумметр измеряет давление только тех газов, которые не конденсируются при температуре ловушки. В этом случае измеренное давление, отсчитываемое вакуумметром, будет ниже полного давления в системе.

Для снижения газовой выделения преобразователя его необходимо обезгазить прогревом. Возможны следующие виды прогрева преобразователей:

внешней печью до температуры не более 700 К;

электронной бомбардировкой;

путем пропускания электрического тока по анодной сетке и другим накаливаемым элементам.

Одновременный прогрев внешней печью и электронной бомбардировкой недопустим, так как воздействием высоких напряжений нагретое стекло легко подвергается электролизу с образованием неустраняемых утечек и нарушением герметичности.

Не рекомендуется также прогревать преобразователи при давлении выше 10^{-2} Па.

Сорбционно-десорбционные эффекты. В диапазоне высокого и сверхвысокого вакуума необходимо учитывать сорбционно-десорбционные явления в манометрическом преобразователе, в вакуумной системе и соединительных трубопроводах и стремиться к исключению их влияния на измерение давления. Преобразователь, если он не открытого типа, соединен с обследуемой системой через трубопровод. При этом между преобразователем и вакуумной системой может быть перепад давлений, вызванный тем, что преобразователь выделяет или откачивает газ.

Давление в вакуумной системе p равно: если преобразователь выделяет газ,

$$p = \frac{Q'}{V}: \quad (14-3)$$

если преобразователь откачивает газ,

$$p = p_m \left(1 + \frac{S_m}{U} \right), \quad (14-4)$$

где p_m — отсчет давления вакуумметром; Q' — поток газа из преобразователя; S_m — быстрота откачивающего действия преобразователя; U — проводимость соединительного трубопровода.

Для уменьшения связанной с этим ошибки необходимо, чтобы соединительные трубопроводы были максимально короткими и наибольшего диаметра.

Для контроля сорбционно-десорбционного состояния, прежде всего стеклянных преобразователей ПМИ-2 и ИМ-12, рекомендуется последовательно с преобразователем и по возможности рядом с ним устанавливать магнитный затвор. Увеличение отсчета давления при закрытии затвора указывает на газовыделение преобразователя, уменьшение — на сорбцию газа в нем. Отсчет давления p_m с дополнительной погрешностью не более δ , %, может быть получен при условии, что скорость изменения давления в преобразователе при закрытом затворе удовлетворяет выражению

$$\left| \frac{\Delta p_m}{\Delta t} \right| \cdot 100 \leq \left| \frac{\delta}{100 + \delta} \right| \frac{U p_m}{V}, \quad (14-5)$$

где $\Delta p_m / \Delta t$ — скорость изменения давления при закрытом затворе; V — объем, отделяемый магнитным затвором (преобразователь и часть трубопровода); U — проводимость трубопровода (с учетом проводимости магнитного затвора).

Сорбционно-десорбционные эффекты должны обязательно быть учтены при разработке и эксплуатации вакуумных систем соответствующим выбором проводимости трубопровода, соединяющего манометрический преобразователь с откачиваемым объемом.

Инерционность отсчета давления. Практически всегда давление газа в системе изменяется во времени. Перепад давления на трубопроводе, соединяющем преобразователь с вакуумным объемом, переходные процессы в самом преобразователе и инерционность измерительного блока будут давать при измерении изменяющихся давлений дополнительную погрешность.

Инерционность процессов характеризуется постоянной времени τ_v . При экспоненциальном законе измене-

ния давления постоянная времени характеризует время возрастания давления до 67% максимального прироста $(1 - e^{-1})$ или снижения давления до 37% максимального уменьшения (e^{-1}) . В течение периода, равного трем постоянным времени $(3\tau_v)$, давления практически выравниваются, относительная разность давлений составляет около 5%.

Постоянная времени манометрического преобразователя равна:

$$\tau_v = \frac{V}{U}, \quad (14-6)$$

где V — объем манометрического преобразователя; U — проводимость трубопровода, соединяющего манометрический преобразователь с вакуумным объемом.

Постоянная времени входных цепей усилителей постоянного тока сверхвысоковакуумных вакуумметров, определяющих инерционность измерительных блоков, равна произведению сопротивления входной цепи на ее емкость.

Инерционность переходных электрических процессов в ионизационных манометрических преобразователях практически можно не учитывать, так как она определяется временем около 10^{-6} с.

Снижению постоянной времени τ_v способствует применение преобразователей с малым объемом и коротким трубопроводом, в пределе — открытых преобразователей, постоянная времени которых менее 10^{-3} с.

Инерционность срабатывания блокировочных устройств вакуумметра определяется инерционностью преобразователя и входных цепей управления. Быстродействие электромагнитных реле, используемых в блокировочных вакуумметрах, равно $(1 - 2) \cdot 10^{-2}$ с.

14-3. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

О величине давления в деформационных вакуумметрах судят по степени деформации чувствительного элемента. В лабораторной практике и промышленности нашли применение деформационные вакуумметры трех основных типов: *трубчатые, мембранные и сильфонные*.

В вакуумметрах с *т р у б ч а т ы м* чувствительным элементом используется эффект изменения радиуса кривизны петлеобразной трубки при изменении давления внут-

при нее. В вакуумметрах с мембраной используется ее прогиб под воздействием избыточного давления с одной из сторон. Для повышения чувствительности и исключения влияния внутренних напряжений мембраны обычно изготавливаются с концентричными гофрами.

Сильфонные вакуумметры по существу не отличаются от мембранных; в них лишь увеличен ход чувствительного элемента.

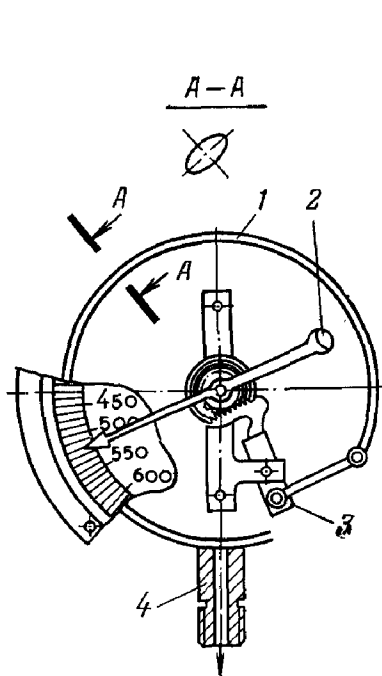


Рис. 14-1. Деформационный вакуумметр с трубчатым чувствительным элементом.

1 — трубка эллиптического сечения;
2 — стрелка; 3 — трубчатый сектор;
4 — штуцер.

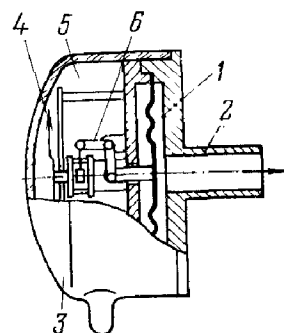


Рис. 14-2. Мембранный вакуумметр.

1 — мембрана; 2 — штуцер;
3 — корпус; 4 — стрелка; 5 — пространство, откачанное до давления не менее 0,1 Па;
6 — рычаг.

Во всех случаях деформации чувствительного элемента весьма малы, и для их индикации применяют трансформирующие механизмы, увеличивающие перемещения отсчетного устройства (стрелки).

В некоторых конструкциях вакуумметров с чувствительным элементом связан индуктивный или емкостный датчик.

На рис. 14-1 и 14-2 показаны устройства трубчатого и мембранного вакуумметров. Промышленностью выпускается широкая серия деформационных вакуумметров, рассчитанных на самые разные условия работы.

Всю совокупность выпускаемых промышленностью деформационных вакуумметров можно разделить на две группы: приборы, измеряющие остаточное абсолютное

давление, и приборы, сравнивающие давление в обследуемом объеме с атмосферным.

Приборы первой группы (МАС-Э1) имеют две камеры. В одной из камер давление поддерживается постоянным (чаще всего не более 1 Па). Другая камера подсоединяется к обследуемому объему. Приборы этой группы указывают непосредственно остаточное давление; барометрическое давление воздуха в помещении на их отсчеты не влияет.

Для измерения остаточного давления приборами второй группы необходимо знать барометрическое давление в помещении в момент измерения.

Постоянная деформационного вакуумметра $K_{д.в}$ может быть найдена при откачке вакуумметров до давления не выше 10^2 Па:

$$K_{д.в} = \frac{p'_6}{h'}, \quad (14-7)$$

где p'_6 — барометрическое давление во время калибровки прибора; h' — показание прибора во время калибровки при его откачке до давления не выше 10^2 Па.

Давление газа с помощью этого прибора определяется по формуле

$$p = p_6 K_{д.в} h, \quad (14-8)$$

где p_6 — барометрическое давление в момент измерения; h — показание прибора при измерении.

Постоянная прибора $K_{д.в}$ стабильна и не требует проверки перед каждой серией измерений.

14-4. ТЕПЛОВЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

Тепловые вакуумметры нашли широкое применение в вакуумной технике и охватывают диапазон давления от 10^{-1} Па до атмосферного. Отдельные пока еще лабораторные приборы измеряют давление от 10^{-3} Па. Тепловые вакуумметры просты по конструкции и надежны в работе. Манометрические преобразователи тепловых вакуумметров не боятся прорыва атмосферы и имеют практически неограниченный срок службы.

Принцип действия тепловых вакуумметров основан на зависимости теплопроводности газа от давления. При низких давлениях, когда средняя длина свободного пути больше среднего расстояния между нагретым телом и стенками преобразователя, теплопроводность газа определяется плотностью частиц, т. е. пропорциональ-

на давлению. При более высоких давлениях, когда средняя длина свободного пути молекул значительно меньше среднего расстояния между нагретым телом и стенками преобразователя, теплопроводность газа не зависит от давления. В области промежуточных давлений передача тепла увеличивается с ростом давления до постоянного значения (см. гл. 1).

При давлениях, близких к атмосферному, и повышенных мощностях нагрева рабочего элемента теплового манометрического преобразователя постоянства теплопереноса не достигается. Становится существенной передача тепла путем конвекции. При этом рабочее положение преобразователя влияет на его чувствительность.

Тепловые преобразователи по принципиальному устройству делятся на две большие группы: *сопротивления* и *термопарные*.

Простейшая конструкция манометрического преобразователя сопротивления теплового вакуумметра представляет собой стеклянную или металлическую трубку, по оси которой натянута нить, нагреваемая пропусканием тока (см. рис. 14-7). Подводимая к нити электрическая энергия расходуется на нагрев газа, излучение и отвод тепла через электрические вводы. При низких давлениях баланс энергии может быть выражен уравнением

$$I^2 R_n (1 + \alpha_n \Delta T) = c_n p \Delta T + \sigma_n (T^4 - T_0^4) + b_n \Delta T, \quad (14-9)$$

где I — ток накала нити; R_n — сопротивление нити преобразователя при температуре окружающей среды; α_n — температурный коэффициент сопротивления материала нити; T — температура нити, T_0 — температура стенки (помещения); $\Delta T = T - T_0$; p — давление газа в преобразователе; c_n , σ_n , b_n — коэффициенты пропорциональности

Давление p можно найти из уравнения (14-9):

$$p = \frac{I^2 R_n (1 + \alpha_n \Delta T) - b_n \Delta T - \sigma_n (T^4 - T_0^4)}{c_n \Delta T}. \quad (14-10)$$

Это уравнение описывает градуировочную кривую преобразователя.

О давлении можно судить как по току накала при постоянстве температур T и T_0 (режим постоянства температур, сопротивления), так и по температуре нити при постоянстве тока накала I . Отсюда два принци-

пиально разных режима работы преобразователей, режим постоянства температуры и одного из электрических параметров питания (тока накала).

Режим постоянства тока накала. Этот режим чаще всего используется при работе с термопарными преобразователями. На рис. 14-3 показано устройство преобразователя ПМТ-2. В стеклянной колбе 1 преобразователя на никелевых вводах закреплен платиновый нагреватель 2, к средней точке которого подсоединена хромелькопелевая термопара 3.

Постоянство тока накала легко реализуется при питании нагревателя относительно большим напряжением, ограниченным балластным резистором. При изменении давления меняется температура нагревателя, а следовательно, и термоэ. д. с. термопары, по величине которой оценивается давление. На рис. 14-4 показаны градуировочные кривые преобразователя ПМТ-2 по воздуху и некоторым газам.

Точность измерения давления термопарными преобразователями существенно зависит от правильного подбора тока накала нагревателя. Ток накала нагревателя преобразователя ПМТ-2 можно определить до вскрытия новой лампы, поскольку давление в запаянном манометрическом преобразователе ниже 10^{-2} Па. При этом теплоотвод по газу от нагревателя пренебрежимо мал, и вся подводимая мощность расходуется на излучение (примерно 63%) и теплоотвод по вводу (примерно 37%). Ток нагревателя подбирают таким, чтобы стрелка милливольтметра точно совпадала с сотым делением шкалы; при этом показание миллиамперметра (шкала «ток накала») будет соответствовать рабочему току нагревателя. Рабочий ток различных преобразователей находится в пределах 90—150 мА.

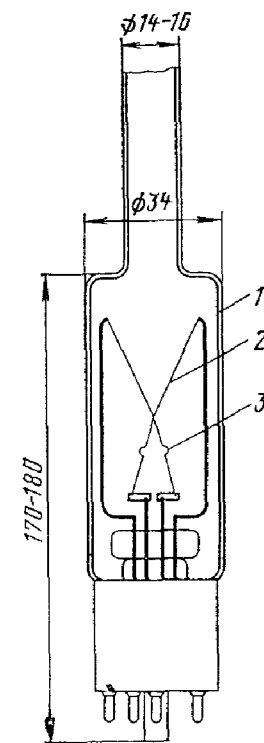


Рис. 14-3. Термопарный манометрический преобразователь ПМТ-2

1 — стеклянная колба; 2 — нагреватель, 3 — термопара

Тепловые преобразователи являются приборами косвенного отсчета давления, и их градуировочные кривые для различных газов различны и определяются молекулярной теплопроводностью по этим газам и коэффициентом температурной аккомодации молекул газа на нагревателе. С достаточной для практики точностью мож-

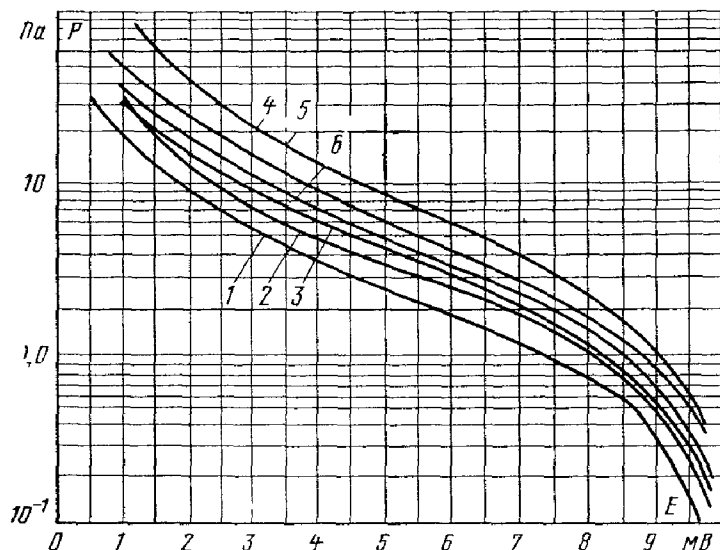


Рис. 14-4. Градуировочные кривые преобразователя ПМТ-2 по воздуху и некоторым газам

1 — водород, 2 — воздух, 3 — гелий, 4 — криптон, 5 — аргон, 6 — неон

но принять, что отношение давлений двух каких-либо газов при одном и том же значении термо-э. д. с. постоянно.

Относительная чувствительность для газов, не указанных в приложении 12, может быть рассчитана с достаточной точностью по формуле

$$\alpha_r = 0,81 \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \frac{\sqrt{M}}{1 - e^{-0,244 \sqrt{M}}}, \quad (14-11)$$

где κ — отношение удельных теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме (см. табл. 1-2); M — молекулярная масса газа.

Для смеси газов относительная чувствительность $\alpha_{г.см}$ равна:

$$\alpha_{г.см} = \frac{1}{\frac{\beta_{г1}}{\alpha_{г1}} + \frac{\beta_{г2}}{\alpha_{г2}} + \frac{\beta_{г3}}{\alpha_{г3}} + \dots}, \quad (14-12)$$

где $\beta_{г1}, \beta_{г2}, \beta_{г3}$ — относительные концентрации газов; $\alpha_{г1}, \alpha_{г2}, \alpha_{г3}$ — соответствующие этим газам коэффициенты относительной чувствительности.

Измерение повышенных давлений термопарными преобразователями, работающими в режиме постоянства тока накала, ограничивается тем, что температура нагревателя резко снижается и чувствительность становится недостаточной. Для расширения диапазона в сторону высоких давлений увеличивают рабочий ток нагревателя. Рабочий ток преобразователя ПМТ-2 при измерении давления в диапазоне 10—100 Па подбирается при атмосферном давлении и термо-э. д. с. 1,2 мВ. Ток нагревателя в этом режиме примерно вдвое больше тока, устанавливаемого при высоком вакууме и термо-э. д. с. 10 мВ. Градуировочная кривая преобразователя ПМТ-2, работающего в этом режиме, показана на рис. 14-5.

В режиме постоянства тока накала преобразователей ПМТ-2 и ПМТ-4М, устанавливаемого при высоком вакууме и термо-э. д. с. 10 мВ, работают вакуумметры ВИТ-2 и ВИТ-3. Вакуумметр ВТ-2А, в котором реализованы оба режима термопарных преобразователей, состоит из трех основных блоков: феррорезонансного стабилизатора напряжения, блока питания преобразователя и блока измерения тока накала и термо-э. д. с. Стабилизированное и выпрямленное напряжение подается на нить нагревателя через балластный резистор, превышающий сопротивление нагревателя в 80—100 раз. В результате ток нагревателя преобразователя весьма

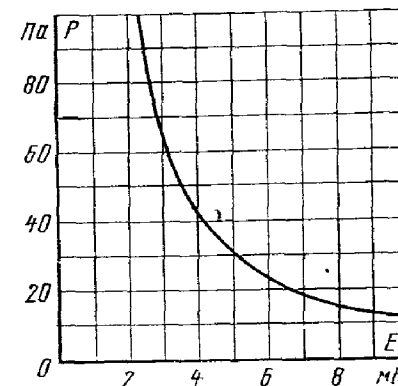


Рис. 14-5. Градуировочная кривая по воздуху преобразователя ПМТ-2, работающего в режиме форсированного тока накала.

стабилен и практически не требует подстройки при изменении давления по всему диапазону.

Режим постоянства температуры (термо-э. д. с., сопротивления). Этот режим используется преимущественно для измерения относительно высоких давлений. Вакуумметр ВТ-3 с термопарными преобразователями наряду с измерением давления в диапазоне 10^{-1} — 10 Па в режиме постоянства тока нагревателя обеспечивает измерение давления до 10^3 Па в режиме постоянства температуры нити (термо-э. д. с. термопары). О давлении газа судят по величине тока накала. При работе в этом режиме прежде всего устанавливается рабочее калибровочное значение термо-э. д. с. термопары преобразователя при токе накала нити 600 мА и атмосферном давлении. Для разных экземпляров преобразователей значения термо-э. д. с. находятся в пределах 4—10 мВ. При измерении давления регулировкой тока накала нити устанавливается калибровочное значение термо-э. д. с. При этом градуировочные кривые всех преобразователей ложатся в довольно узкую полосу ($\pm 15\%$ по давлению).

Перед каждым отсчетом давления вакуумметром ВТ-3 вручную устанавливается рабочее значение термо-э. д. с. и по величине тока нагревателя определяется давление. На рис. 14-6 приведен ряд градуировочных кривых преобразователя ПМТ-2 в режиме постоянной температуры для воздуха и некоторых газов. Градуировочные кривые для других газов могут быть определены с использованием пересчетных коэффициентов. Отметим, что при работе в этом режиме снижение давления ниже 10 Па может при токе накала, установленном на высоких давлениях, привести к перегреву нити ввиду незначительного теплоотвода через газ.

Работа термопарных преобразователей в режиме постоянства температуры или сопротивления нагревателя затруднена из-за необходимости стабилизации слабого сигнала, имеющего величину порядка милливольт, когда собственные флуктуации усилителя превышают допустимую нестабильность термо-э. д. с.

Автоматическая стабилизация температуры (сопротивления) рабочей нити становится легко достижимой в преобразователях сопротивления, в которых величина сопротивления рабочей нити на несколько порядков выше сопротивления переходных контактов.

На рис. 14-7 показана конструкция теплового манометрического преобразователя ПМТ-6-3. В тонкостенном корпусе 1 смонтирован нагреватель 2 из платиновой проволоки диаметром 12 мкм с сопротивлением при температуре 293 К, равным 72 Ом.

Преобразователь работает в режиме постоянства сопротивления нагревателя 116,5 Ом, при этом температура нагревателя составляет 473 К.

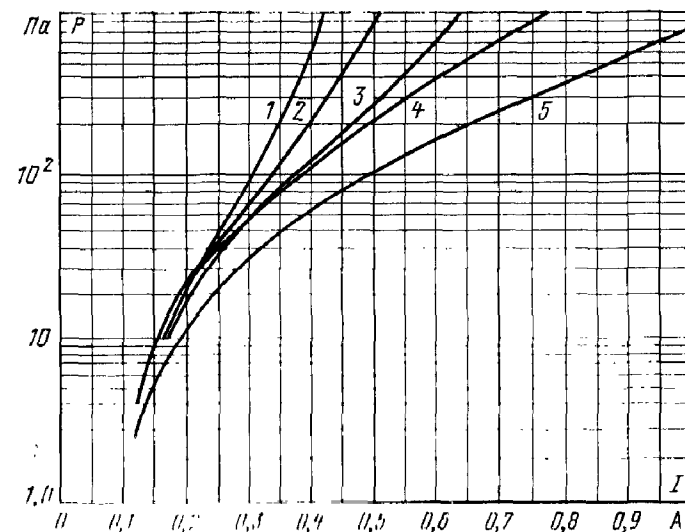


Рис. 14-6. Градуировочные кривые преобразователя ПМТ-2, работающего в режиме постоянства температуры.

1 — воздух; 2 — аргон; 3 — неон; 4 — гелий; 5 — водород.

На рис. 14-8 показана принципиальная электрическая схема питания и измерения полезного сигнала преобразователя ПМТ-6-3. Преобразователь П включен в одно из плеч моста резисторов генератора переменного тока Г, который одновременно стабилизирует напряжение разбаланса между точками в и г. Изменение давления в преобразователе приводит к изменению температуры сопротивления нагревателя, а следовательно, и нарушению заданного разбаланса моста. Генератор изменяет напряжение питания между точками а и б настолько, что разбаланс остается на прежнем уровне. Напряжение питания преобразователя (между точками а, с) зависит от давления, и по его величине судят

о давлении. При изменении давления от 10^{-1} до 10^5 Па напряжение питания преобразователя ПМТ 63 изменяется от 0,3 до 7 В.

Калибровка шкалы тепловых вакуумметров. Ход градуировочной кривой тепловых преобразователей определяется диаметром и длиной рабочей нити, состоянием ее поверхности и температурой. Отклонение этих

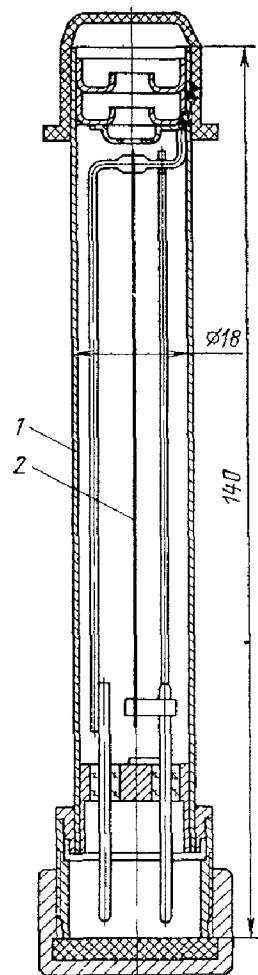


Рис 14-7 Тепловой манометрический преобразователь ПМТ 63
1 — корпус 2 — нагреватель

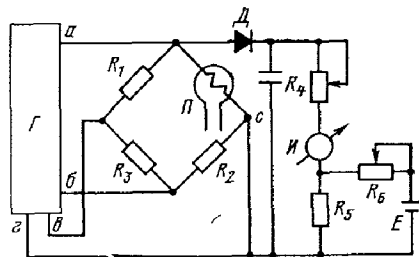


Рис 14-8 Принципиальная электрическая схема питания и измерения сигнала преобразователя ПМТ 63

Г — генератор П — преобразователь
И — измерительный прибор Д — выпрямитель С — конденсатор
R₁ — резисторы E — источник напряжения

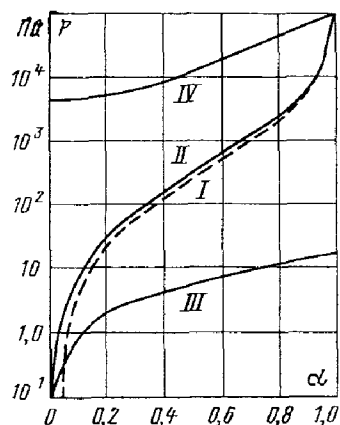


Рис 14-9 Градуировочные кривые преобразователя ПМТ-63, работающего в режиме постоянного сопротивления рабочей нити

I — кривая напряжения питания II — кривая откалиброванная в двух точках III и IV — расширение диапазона за счет повышения чувствительности на краях

величин от номинальных, естественно, приводит к разбросу градуировочных кривых. Чтобы его уменьшить, вакуумметр с конкретным преобразователем калибруют при некоторых, «опорных», давлениях — атмосферном или бесконечно малом по отношению к его рабочему диапазону — установкой стрелки шкалы в крайнее положение.

Применение калибровки теплового вакуумметра сопротивлению при атмосферном давлении позволяет индивидуальные кривые преобразователей с их реальным разбросом параметров связать в одной точке — в конце шкалы.

Существенное снижение погрешности измерения давления дает калибровка шкалы вакуумметра в двух точках: при атмосферном и «нулевом» давлениях (на один-два порядка более низком, нежели наименьший возможный отсчет давления прибором) [30].

Такая калибровка проводится по схеме измерений, показанной на рис 14-8.

При практической работе с вакуумметром сначала проводят калибровку при атмосферном давлении. С помощью резистора R_4 стрелка измерительного прибора устанавливается на конец шкалы. Затем при весьма низких давлениях (ниже $5 \cdot 10^{-2}$ Па) производится калибровка нуля. Изменением сопротивления резистора R_6 стрелка измерительного прибора устанавливается на нуль шкалы.

Калибровка вакуумметра в двух точках позволяет резко снизить ошибку в измерении давления. Так, при отклонении напряжения питания преобразователя при «нулевом» давлении на 0,1 В от номинального значения 0,3 В дополнительная относительная ошибка измерения давления вакуумметром ВТБ 1 (работающим с преобразователем МТ-63), откалиброванным на концах шкалы, монотонно возрастает от 1,34% при атмосферном давлении до 30% при «нулевом» давлении.

В аналогичных условиях калибровка вакуумметра только при атмосферном давлении дает ошибку при давлении 10 Па — 27%, при давлении 1 Па — 270%, а при давлении 0,1 Па отсчет давления может быть искажен в 27 раз.

Калибровка вакуумметра в двух точках, помимо снижения погрешности измерения давления, позволяет путем растяжки кривой с малой крутизной изменения сиг-

Нам по давлению расширить общий диапазон измеряемых давлений. На участке низких давлений расширение диапазона достигается путем повышения чувствительности измерения выходного сигнала (кривая III рис. 14-9). Путем независимой компенсации до указанного способу относительно большого сигнала (80—90% максимального) оставшийся участок градуировочной кривой «растягивается» на всю шкалу (кривая IV, рис. 14-9). Двухточечная калибровка позволяет, не изменяя конструкции преобразователя или режима его работы, только за счет соответствующей обработки выходного сигнала давления расширить диапазон на один-два порядка в обе стороны. Вакуумметр ВТБ-1 в номинальном режиме работы преобразователя ПМТ-6-3 измеряет давление от 10^{-1} до 10^5 Па, в то время как вакуумметр ВСБ-1 с одноточечной калибровкой при атмосферном давлении обеспечивает измерение давления лишь в диапазоне $1—4 \cdot 10^3$ Па.

Инерционность тепловых преобразователей. Некоторым недостатком тепловых преобразователей является их относительная инерционность, которую необходимо учитывать при проектировании многопозиционных вакуумметров с опросом отдельных преобразователей и систем автоматики на основе тепловых преобразователей. Инерционность в основном определяется временем разогрева нити преобразователя до рабочего состояния.

Проведенные измерения [4] показали, что постоянная времени термометрического преобразователя ПМТ-2 при возрастании давления с 10^{-1} до 10 и 30 Па равна 4 и 2 с соответственно. При работе в области низких давлений (в диапазоне 0,1—1 Па) инерционность еще выше. Практически безынерционны преобразователи сопротивления с тонкой нитью диаметром около 10 мкм, для которых постоянная времени входа в режим при включении (опросе в многопозиционном вакуумметре) равна не более 0,01 с во всем диапазоне давлений. Инерционность изменения режима питания нити при изменении давления (время перестройки режима питания) резко зависит от начального и конечного давления и направления его изменения. Так, постоянная времени при импульсном возрастании давления от 10 до 40 Па равна около 0,04 с. В худшем случае при уменьшении давления вблизи нижней границы диапазона она не превышает, по-видимому, 0,1 с.

О термокомпенсации. Показания тепловых вакуумметров существенно зависят от температуры окружающей среды. Метрологические характеристики вакуумметров получены при их работе в диапазоне температур 288—298 К. Работа при другой температуре требует индивидуальной градуировки при этой температуре или температурной компенсации вносимой погрешности.

Наиболее полную компенсацию влияния температуры окружающей среды на тепловой преобразователь, работающий в режиме постоянства сопротивления, дает применение компенсирующего резистора, который закрепляется на баллоне или в разъеме преобразователя, там, где он наиболее точно и безынерционно следует за температурой окружающей среды. В электрической схеме компенсирующий резистор устанавливается в соседнее с преобразователем плечо моста. Компенсирующий резистор должен иметь определенную величину температурного коэффициента сопротивления во всем диапазоне температур. Этот резистор делается составным: часть его, намотанная из никелевой или медной проволоки, закрепляется около преобразователя, а другая часть монтируется в измерительном блоке. Резистор, укрепленный в разъеме преобразователя ПМТ-6, обеспечивает независимость показаний вакуумметра ВТБ-1 при изменении температуры преобразователя от 278 до 308 К.

Вакуумные тепловые реле. Реле РВТ-2, состоящее из радиотехнического блока и манометрического преобразователя ПМТ-6 (ПМТ-6-3), обеспечивает блокировку и управление по давлению в диапазоне $1—4 \cdot 10^3$ Па и выход аналогового сигнала от 0 до 10 В. Реле обеспечивает двухточечную блокировку на верхний и нижний предел срабатывания по двум независимым каналам.

Для целей блокировки по давлению в диапазоне низкого вакуума может быть использовано биметаллическое

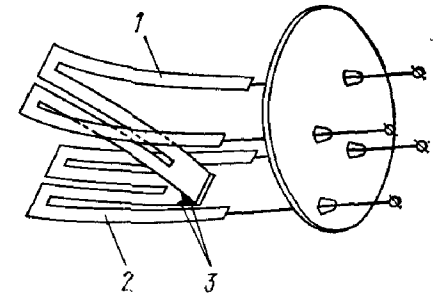


Рис. 14-10. Биметаллическое вакуумное реле РВБ-1.

1, 2 — рабочие биметаллические пластины; 3 — контакты.

ческое вакуумное реле РВБ-1, показанное на рис. 14-10 [5]. Контактная группа реле состоит из двух М-образных конструкций 1 и 2, каждая из которых закреплена на двух выводах разъема и собрана из биметаллических полос. По одной из конструкций пропускается ток, другая является компенсационной — компенсирует влияние температуры окружающей среды.

При нагреве биметаллические пластины начинают деформироваться. Замыкание контактов 3 реле происходит при определенной температуре, которая зависит от тока нагрева биметаллических пластин и давления разреженного газа. При фиксированном токе нагрева 0,53 А замыкание контактов происходит при давлении газа 24 Па. При давлении выше точки срабатывания контакты разомкнуты, ниже — замкнуты. Ток через контакты реле от исполнительного устройства должен быть не более 5 мА при напряжении до 20 В. Время срабатывания реле при повышении давления от 1 Па до атмосферного не более 10 с, при резком обратном понижении давления — не более 1 мин.

14-5. ЭЛЕКТРОННЫЕ ИОНИЗАЦИОННЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

Работа ионизационных манометрических преобразователей основана на ионизации газа электронным потоком и измерении ионного тока, по величине которого судят о давлении.

Число электронно-ионных пар (вероятность ионизации), образующихся при столкновении электрона с молекулой газа, зависит от энергии электрона и рода газа (рис. 14-11). Максимальной вероятности ионизации соответствует энергия от 75 до 150 эВ. Для конкретных конструкций ионизационных преобразователей с их напряжением на электродах и рабочим распределением потенциала в пространстве взаимодействия электронов с молекулами газа вводится понятие чувствительности S_m — число электронно-ионных пар, образуемых электроном при единичном давлении данного газа.

Конструкция наиболее распространенного отечественного электронного ионизационного манометрического преобразователя ПМИ-2 показана на рис. 14-12. В стеклянном баллоне преобразователя 1 смонтирована трех-электродная система, состоящая из коллектора ионов 2, анодной сетки 3 и прямонакального катода 4. На анод-

ную сетку относительно катода подается напряжение +200 В, а на цилиндрический коллектор ионов —50 В. Анодная сетка преобразователя выполнена из вольфрамовой проволоки диаметром 0,2 мм в виде бифилярной спирали. При прогреве преобразователя для обезгаживания по спирали пропускается ток 3 А.

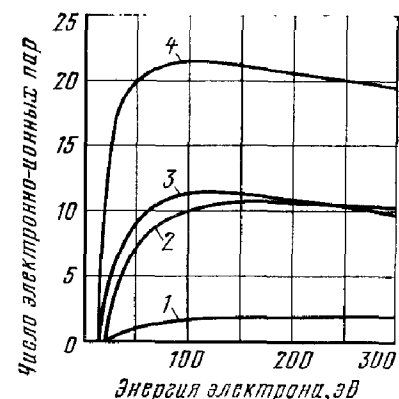


Рис. 14-11. Вероятность ионизации молекул газов — число электронно-ионных пар, образуемых движущимся электроном на пути в 1 см при давлении 133 Па.
1 — гелий; 2 — азот; 3 — аргон; 4 — ртуть.

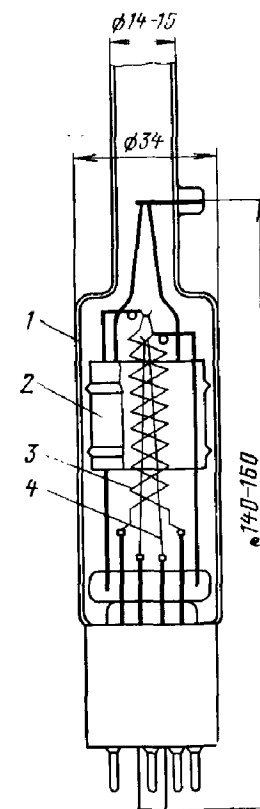


Рис. 14-12. Электронный ионизационный манометрический преобразователь ПМИ-2.

Вольфрамовый катод преобразователя испускает электроны, которые двигаются к аноду. Часть электронов пролетает сквозь анодную сетку и попадает в пространство, заключенное между анодом и коллектором. Так как коллектор имеет отрицательный потенциал относительно катода, электроны не могут попасть на коллектор. В точке пространства с нулевым потенциалом электроны останавливаются и начинают движение в противоположном направлении — к положительно заряженной анодной сетке. В результате у сетки непрерывно колеблются электроны, причем прежде чем попасть на

анод, электроны совершают в среднем до пяти колебаний. При столкновении электронов с молекулами газа происходит их ионизация. Образовавшиеся положительные ионы собираются на находящемся под отрицательным потенциалом коллекторе, создавая в его цепи ионный ток. Ионный ток $I_{и}$ пропорционален электронному току I_e и давлению p_M в полости манометрического преобразователя:

$$I_{и} = s_M I_e p_M, \quad (14-13)$$

где s_M — чувствительность преобразователя, Па⁻¹.

Для получения однозначной зависимости ионного тока от давления электронный понижующий ток преобразователя поддерживают постоянным. Произведение $s_M I_e$ характеризует величину ионного тока на единицу давления, А/Па («токовая» чувствительность).

Чувствительность ионизационных преобразователей зависит от рода газа (см. приложение 12).

Относительная чувствительность ионизационных вакуумметров является величиной аддитивной и для смеси газов может быть определена по уравнению

$$\alpha_{г.см} = \alpha_{г1} \beta_{г1} + \alpha_{г2} \beta_{г2} + \alpha_{г3} \beta_{г3} + \dots, \quad (14-14)$$

где $\alpha_{г1}$, $\alpha_{г2}$, $\alpha_{г3}$ — относительные чувствительности; $\beta_{г1}$, $\beta_{г2}$, $\beta_{г3}$ — относительные концентрации газов.

Ионизационный преобразователь ПМИ-2 имеет линейную зависимость ионного тока от давления в диапазоне $5 \cdot 10^{-6}$ —1 Па. Его чувствительность по воздуху составляет 0,173 Па⁻¹. В режиме вакуумметров ВИТ-2 и ВИТ-3 «токовая» чувствительность равна $8,6 \cdot 10^{-5}$ А/Па. В указанном выше рабочем диапазоне давлений ионный ток в цепи коллектора изменяется от $4 \cdot 10^{-10}$ до 10^{-4} А.

Долговечность преобразователя ПМИ-2 определяется сроком службы катода и резко уменьшается с ростом давления. При давлении 0,3 Па срок службы составляет примерно 14 ч, а при давлении 1,3 Па — всего 2,5 ч. Применять преобразователь при давлениях выше 10^{-1} не рекомендуется. Для измерения давления воздуха до 1 Па предназначен ионизационный преобразователь ПМИ-3-2, который является модификацией преобразователя ПМИ-2. Вместо вольфрамового катода в нем применен иридиевый воздухостойкий катод с покрытием из окиси иттрия. Благодаря высокой стойкости иридие-

вого катода к кислороду и другим химическим активным газам преобразователь ПМИ-3-2 при работе с вакуумметром ВИТ-2 или ВИТ-3 в режиме тока эмиссии 0,5 мА обеспечивает измерение давлений до 1 Па при долговечности преобразователя не менее 100 ч. Преобразователь имеет открытую конструкцию, предназначен для применения на металлических прогреваемых установках и допускает прогрев при обезгаживании до 700 К. Конструкция катодного узла преобразователя обеспечивает не только быструю замену перегоревшего катода новым, но и применение как иридиевого катода, так и вольфрамового. При частом измерении низких (ниже 10^{-2} Па) давлений применение преобразователя с иридиевым катодом не оправдано. Прибор с вольфрамовым катодом в этих условиях является более предпочтительным, так как он имеет больший срок службы, не загрязняется продуктами испарения с катода и его температура стабильна.

Электронные ионизационные преобразователи для измерения среднего вакуума. Верхний предел рабочего диапазона электронных ионизационных манометрических преобразователей ограничен несколькими причинами.

1. Малым сроком службы обычного вольфрамового термокатода, который в присутствии химически активных газов выходит из строя.

2. Искривлением линейной зависимости ионного тока в цепи коллектора от давления газа в связи с тем, что длина пути электрона в приборе становится сравнимой с длиной свободного пути электрона в газе. В этом случае в ионизации газа участвуют почти все электроны, в то время как при давлении $6 \cdot 10^{-5}$ Па в преобразователе ПМИ-2 ионизирует только 10^{-5} часть их. Прибор плавно переходит к режиму электрического разряда в газе, который характеризуется равенством электронного тока на анод ионному току на коллектор и другие электроды. Из уравнения (14-13) можно определить верхний теоретический предел измеряемых давлений $p_{M, макс}$.

При $I_{и} = I_e$ имеем:

$$p_{M, макс} = \frac{1}{s_M}. \quad (14-15)$$

3. Образованием в зоне анод — коллектор значительного положительного пространственного заряда, вызван-

ного положительными ионами,двигающимися с малой скоростью к коллектору. Этот положительный заряд удлиняет размах колебаний электрона, что иногда приводит к некоторому повышению чувствительности.

Анализ всех этих факторов позволил сформулировать основные требования, предъявляемые к электронным ионизационным вакуумметрическим преобразователям для измерения высоких давлений. Такой прибор должен иметь:

высокостойкий против химического воздействия газов катод;

малую чувствительность s_m , т. е. небольшое расстояние между катодом и анодом;

прямой, без колебаний, характер движения электронов с катода на анод;

высокую эффективность улавливания образовавшихся положительных ионов коллектором;

малую плотность электронного тока в преобразователе.

В соответствии с этими требованиями разработаны электронные ионизационные вакуумметрические преобразователи [44], позволившие обеспечить измерение давления воздуха до 100 Па. Электродная система преобразователя ПМИ-10-2 (рис. 14-13) состоит из двух параллельных никелевых пластин 2, являющихся коллектором ионов, и расположенной между ними относительно толстой пластины 4 с овальным вырезом в центре, служащей анодом. По оси овального выреза расположен П-образный воздухостойкий катод 3. На иридиевом керне катода нанесено покрытие из окиси иттрия, обеспечивающее сравнительно низкую рабочую температуру. Иридиевый керн катода обуславливает его химическую стойкость против высоких давлений активных газов. Электроды преобразователя смонтированы на жестких коваровых выводах, впаянных в металлический корпус 1.

В электронных ионизационных вакуумметрических преобразователях, работающих вблизи своего верхнего теоретического предела, необходимо стабилизировать катодный эмиссионный ток, а не анодный. Анодный ток всегда больше катодного, поскольку, помимо электронного тока, с катода на анод приходят вторичные электроны, образовавшиеся при ионизации газа. При напряжении на аноде относительно коллектора +180 В, напряжении на катоде относительно коллектора +50 В

(напряжение анод — катод равно +130 В) и эмиссионном электронном токе с катода 10^{-4} А преобразователь ПМИ-10-2 способен измерять давление от 10^{-3} до 100 Па. Чувствительность преобразователя $7,5 \cdot 10^{-3}$ Па $^{-1}$.

Долговечность катода при давлении воздуха 100 Па не менее 100 ч; при более низких давлениях долговечность существенно выше.

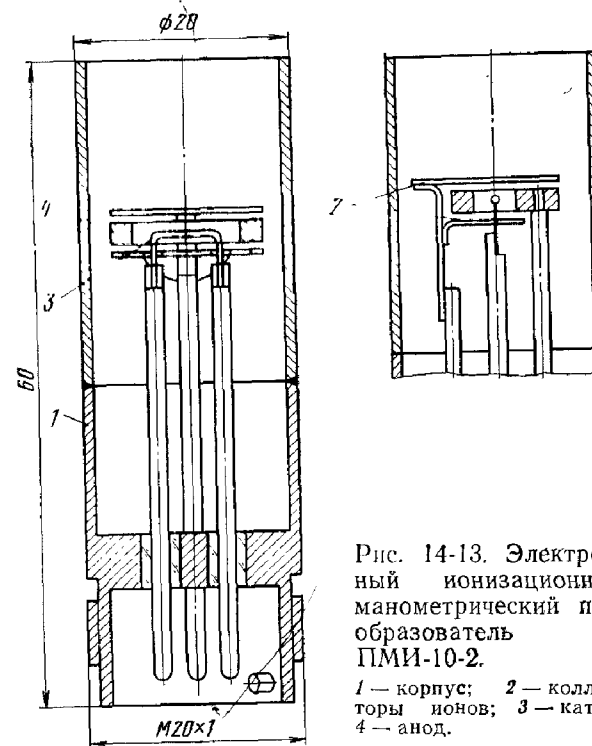


Рис. 14-13. Электронный ионизационный манометрический преобразователь ПМИ-10-2.

1 — корпус; 2 — коллекторы ионов; 3 — катод; 4 — анод.

Разные газы влияют на работу катода не одинаково. При высоком давлении водорода мощность накала катода для получения заданной электронной эмиссии должна быть существенно увеличена из-за сильного охлаждения катода. Пары воды несколько уменьшают эмиссионную способность катода; для получения той же эмиссии требуется заметное повышение температуры. В атмосфере азота эмиссионная способность катода резко увеличивается и требуемая температура его понижается.

При высоких (более 10^{-2} Па) давлениях катод может работать только в режиме искусственной стабили-

зации эмиссии с помощью изменения накала. В противном случае малейшее изменение давления приводит к резкому, на несколько порядков изменению тока эмиссии.

При включенном накале, но не стабилизированном токе эмиссии катод выдерживает несколько десятков

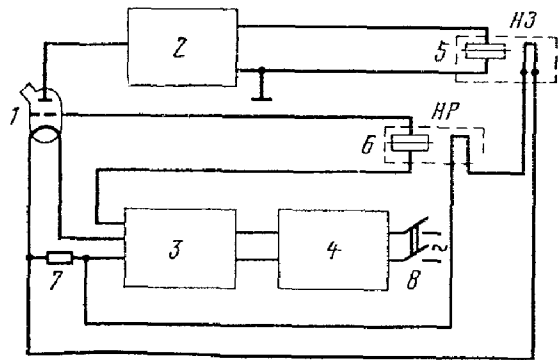


Рис 14 14 Принципиальная электрическая схема защиты катода электронного ионизационного преобразователя

1 — манометрический преобразователь 2 — усилитель измеритель ионного тока, 3 — стабилизатор эмиссии катода 4 — блок питания 5 — реле защиты катода 6 — реле возврата катода в рабочий режим 7 — ограничивающий резистор 8 — тумблер включения сети

напусков атмосферы без заметного ухудшения своих эмиссионных свойств. После откачки до рабочих значений давления эмиссия катода восстанавливается практически полностью без какой бы то ни было искусственной активировки.

Отключение стабилизатора при высоких давлениях для сохранения катода несложно осуществить автоматически. На рис 14-14 показана принципиальная электрическая схема защиты катода от аварийных перегрузок и автоматического ввода его в номинальный режим при рабочих давлениях, используемая в вакуумметре ВИТ-3. Дополнительно к реле 5 срабатывания защиты катода от перегрузок, включенного на выход усилителя ионного тока 2 и реагирующего на повышение ионного тока, в цепь анодного тока преобразователя включено еще одно реле 6. При возрастании ионного тока преобразователя выше допустимого предела (высокое давление) размыкаются нормально замкнутые контакты реле 5 и в цепь накала катода оказывается включенным дополнительный резистор 7. В связи с уменьшением тока

накала катода его эмиссия падает и исполнительные контакты реле 6 размыкаются. Резистор 7 ограничивает накал катода настолько, что дальнейшее повышение давления до атмосферного становится безопасным. Резистор 7 подбирается таким, чтобы после понижения давления до значения, несколько меньшего давления

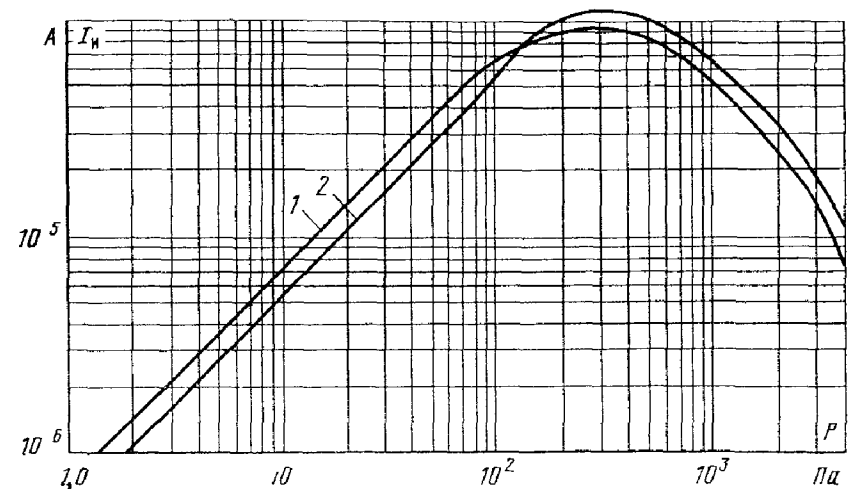


Рис 14 15 Градуировочные кривые преобразователя ПМИ 10 2

1 — в диапазоне давления $1 - 4 \cdot 10^3$ Па 2 — при повышенном отрицательном напряжении на коллекторе относительно катода -80 В вместо -50 В

срабатывания защиты катода, в цепи катода появился ток эмиссии. При понижении давления появившийся ток замыкает контакты реле 6. Резистор 7 шунтируется и преобразователь работает в номинальном режиме.

У электронных ионизационных манометрических преобразователей имеются два участка зависимости ионного тока от давления (рис 14-15, кривая 1) — участок прямой пропорциональности ионного тока давлению (при низких давлениях) и падающий криволинейный участок (при высоких давлениях). На падающем участке кривой электрон сталкивается дважды и даже трижды с молекулами газа, пока не попадет на анод преобразователя. Вместе с тем с ростом давления снижается энергия электронов, т. е. вероятность ионизации. Одновременно в связи с малой подвижностью ионов в плазме резко возрастают процессы рекомбинации их электронами.

Воздухостойкость иридиевых катодов допускает возможность контроля давления по ниспадающему участку

ку, однако в связи с тем, что одному и тому же отсчету ионного тока могут соответствовать два значения давления — на линейном и на ниспадающем участках, возникает задача определения участка кривой, по которому необходимо производить измерение давления. Изменение потенциала коллектора относительно катода позволяет решить эту задачу. При низких давлениях (в области линейной зависимости ионного тока от давления) увеличение отрицательного потенциала коллектора приводит к снижению ионного тока из-за уменьшения длины пути электронов в преобразователе. При высоких давлениях (в области падающей ветви кривой) увеличение отрицательного потенциала приводит к увеличению скорости движения ионов, т. е. к уменьшению времени их пребывания в пространстве взаимодействия. В результате ионный ток возрастает. Кривая 2 на рис. 14-15 показывает зависимость ионного тока в цепи коллектора преобразователя ПМИ-10-2 от давления при повышенном отрицательном напряжении на коллекторе, а кривая 1 — при номинальном режиме работы.

Указанный метод индикации универсален и справедлив для любого типа ионизационных преобразователей.

Отключение защиты катода воздухостойкого преобразователя ПМИ-10-2 наряду с возможностью измерения давления по рабочему участку градуировочной кривой позволяет дополнительно индцировать давления по ниспадающему участку вплоть до $4 \cdot 10^3$ Па.

Электронные ионизационные манометрические преобразователи для измерения сверхвысокого вакуума. Нижний предел рабочего диапазона электронных ионизационных манометрических преобразователей определяется фоновым током, не зависящим от давления. Это прежде всего фоновый ток фотоэлектронной эмиссии с коллектора и ток ионно-электронной десорбции с анода. Фоновый ток фотоэлектронной эмиссии образуется при облучении коллектора ионов мягким рентгеновским излучением с анода, возникающим при бомбардировке его электронным потоком. Фоновый ток фотоэлектронной эмиссии равен:

$$I_{\text{фэ}}^{\text{н}} = k_{\text{фэ}} I_e Z_a U_{\text{ак}}^n, \quad (14-16)$$

где $k_{\text{фэ}}$ — коэффициент пропорциональности; I_e — электронный ток на анод, Z_a — атомный номер материала анода, n — показатель степени; по разным данным его

величина находится в пределах от 1,4 до 2,0, $U_{\text{ак}}$ — напряжение на аноде относительно катода; φ — телесный угол, под которым коллектор просматривается с анода.

Фоновый ток фотоэлектронной эмиссии преобразователей ПМИ-2 и ПМИ-10-2 имеет значение, соответствующее давлениям $5 \cdot 10^{-7}$ и $5 \cdot 10^{-5}$ Па, т. е. давление $5 \cdot 10^{-6}$ Па преобразователь ПМИ-2 измеряет с дополнительной погрешностью в 10%.

Нижний теоретический предел измеряемых давлений $p_{\text{м мин}}$, определяемый условием $I_{\text{и}} = I_{\text{фэ}}$, равен:

$$p_{\text{мин}} = \frac{R_{\text{фэ}}}{S_{\text{м}}}, \quad (14-17)$$

где $S_{\text{м}}$ — чувствительность; $R_{\text{фэ}}$ — фоновая постоянная. Фоновая постоянная $R_{\text{фэ}}$, определяемая фоновым током фотоэлектронной эмиссии, равна:

$$R_{\text{фэ}} = k_{\text{фэ}} Z_a U_{\text{ак}}^n. \quad (14-18)$$

Для снижения фоновой фотоэлектронной постоянной уменьшают прежде всего телесный угол φ , для этого коллектор преобразователей сверхвысоковакуумного диапазона выполняется в виде тонкой нити или стержня.

Возможен еще один источник значительной ошибки при измерении низких давлений. Электронный поток на анод наряду с десорбцией газа с его поверхности производит частичную его ионизацию [33]. Вместе с ионами из газовой фазы ионы десорбирующегося газа также поступают на коллектор и искажают отсчет давления.

Загрязнение анодной сетки может быть как внутреннего характера за счет диффузии примеси из металла во время прогрева, так и наружного — при сорбции поверхностью анода некоторых компонентов газовой атмосферы.

При давлениях выше 10^{-5} Па эффектами ионно-электронной десорбции можно пренебречь. При более низких давлениях снижение токов ионной десорбции требует мощного и длительного прогрева анодной сетки преобразователя.

Для измерения давления до 10^{-8} Па промышленностью выпускается серия электронных ионизационных манометрических преобразователей с осевым коллектором ионов.

Коллектор ионов преобразователей ПМИ-12-8, ПМИ-27 и ПМИ-12 установлен по оси анодной сетки и выполнен в виде тонкого вольфрамового стержня, имеющего в основании диаметр 0,1 мм и постепенно утончающегося к вершине.

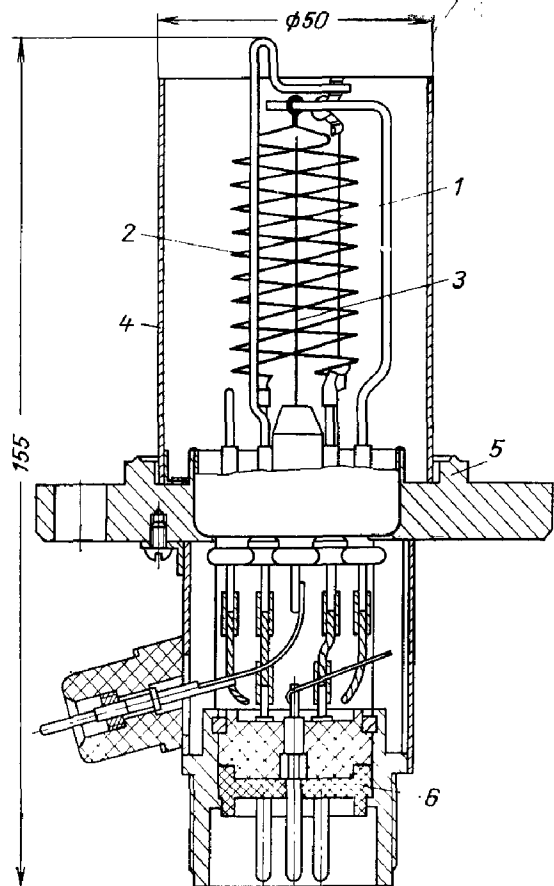


Рис. 14-16. Электронный ионизационный преобразователь ПМИ-12-8.

1 — катод; 2 — анодная сетка; 3 — коллектор; 4 — экран; 5 — фланец; 6 — цоколь.

Преобразователи ПМИ-12-8 и ПМИ-27 имеют сменный катод, расположенный с наружной стороны анодной сетки. Как и в преобразователе ПМИ-2, электроны колеблются по обе стороны анодной сетки. На коллектор попадают только те ионы, которые образовались внутри нее. Анодная сетка 2 преобразователя ПМИ-12-8

(рис. 14-16) может быть обезгажена электронной бомбардировкой или пропусканием тока по ней. В последнем случае она может быть нагрета до 1100 К.

Электроды преобразователей ПМИ-12-8 и ПМИ-27 размещаются непосредственно в вакуумном объеме. Для исключения влияния окружающих преобразователь металлических конструкций вакуумной системы на метрические характеристики преобразователя и воздействия различного рода наводок электродная система окружена металлическим экраном 4. В преобразователе ПМИ-12-8 экран электрически соединен с корпусом (фланцем) преобразователя. В преобразователе ПМИ-27 экран электроизолирован. При давлениях выше 10^{-2} Па экран отключается от общего минуса и используется в качестве анода. Коллектором ионов служит в этом случае анодная сетка преобразователя. Такое изменение коммутации электродов позволяет измерять давление до 13 Па.

14-6. МАГНИТНЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

В манометрических преобразователях магнитных электроразрядных вакуумметров используется зависимость разрядного тока в анодно-катодном промежутке от давления. Простейший электроразрядный преобразователь представляет собой двухэлектродную систему, состоящую из катода и анода.

Через балластный резистор на анод подается высокое напряжение. Вдоль оси прибора прикладывается постоянное магнитное поле индукцией 0,05—0,2 Тл, которое стабилизирует плазму в разрядном промежутке и повышает чувствительность преобразователя.

Если вблизи катода по каким-либо причинам появляется электрон, то под совместным действием электрического и магнитного полей он будет двигаться к положительно заряженному аноду по удлиненной траектории. При этом повышается вероятность соударения электронов с молекулами остаточного газа и их ионизация.

Образовавшиеся при ионизации положительные ионы перемещаются к катоду и нейтрализуются на нем. Обладая значительной энергией, положительные ионы при встрече с катодом выбивают из его материала вторичные электроны, которые, двигаясь к аноду, также производят ионизацию газа.

Ток положительных ионов на катод и ток вторичных электронов с него в сумме численно равны электронному току в цепи анода. В результате ионизации газа возникает электрический разряд, ток которого в достаточно широком диапазоне зависит от давления. Зависимость тока разряда I_p в преобразователе от давления газа p может быть выражена приближенной формулой

$$I_p = \frac{U_{x,x} - U_0}{R_0 + \frac{1}{\kappa p^n}}, \quad (14-19)$$

где $U_{x,x}$ — напряжение холостого хода источника питания преобразователя; U_0 — минимальное напряжение между электродами преобразователя при наибольшем измеряемом давлении; R_0 — сопротивление внешнего балластного резистора; κ — чувствительность преобразователя; n — показатель степени, обычно $n = 0,9 \div 1,15$.

В широком диапазоне давлений, когда $U_{x,x}/I_p \gg R_0$,

$$I_p = \kappa p^n, \quad (14-20)$$

где $\kappa_p = (U_{x,x} - U_0) \kappa$.

Магнитные электроразрядные преобразователи не содержат в своей конструкции нагретых деталей, вследствие чего не боятся окисления и могут включаться при любом давлении в системе. При измерении давлений электроразрядными вакуумметрами наблюдается эффект поглощения газов в преобразователе, обусловленный ионной откачкой.

В силу большой устойчивости преобразователей к внешним воздействиям и простоты эксплуатации магнитные электроразрядные вакуумметры нашли широкое распространение для блокировки и управления технологическими процессами.

Вся совокупность магнитных электроразрядных преобразователей может быть классифицирована по взаимному направлению электрического и магнитного полей на две большие группы: преобразователи с параллельными электрическим и магнитным полями (преобразователи Пеннинга) и преобразователи со скрещивающимися полями. Здесь в свою очередь возможны две разновидности преобразователей: магнетронные и инверсно-магнетронные. На рис. 14-17 показаны принципиальные схемы преобразователей всех типов и траектории

движения электронов в них. Для всех магнитных электроразрядных преобразователей характерно то, что прямой полет электрона на анод запрещен благодаря применению значительного по величине магнитного поля. В преобразователе с параллельными электрическим и магнитным полями (рис. 14-17, а) доминирует возврат-

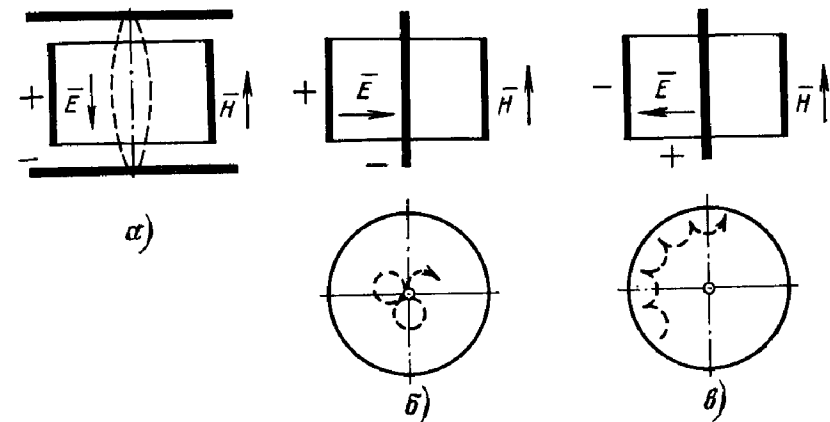


Рис. 14-17. Классификация магнитных электроразрядных преобразователей и траектории основного движения электронов в них.

а — преобразователь со взаимно параллельными электрическим и магнитным полями (преобразователь Пеннинга); б — магнетронный; в — инверсно-магнетронный преобразователь со взаимно перпендикулярными электрическим и магнитным полями; \vec{E} — вектор напряженности электрического поля; \vec{H} — вектор напряженности магнитного поля.

но-поступательное движение электронов вдоль оси, причем по мере приближения к аноду электрон приобретает одновременно циклоидальный характер движения. В магнетронной и инверсно-магнетронной конструкциях электрон движется по циклоиде (рис. 14-17, б) и гипоциклоиде (рис. 14-17, в).

При своем движении от столкновения до столкновения электроны проходят громадные расстояния, исчисляемые в диапазоне сверхвысокого вакуума километрами. Время жизни электрона или развития электронных лавин зависит от давления и в диапазоне сверхвысокого вакуума оценивается единицами и десятками миллисекунд. Положительные ионы практически сразу выходят из пространства ионизации за время, исчисляемое микросекундами.

Балластный резистор, ограничивая ток разряда, препятствует переходу его при высоких давлениях в дуговой,

Нижний предел измеряемых электроразрядными преобразователями давлений ограничивается трудностью возникновения разряда, а также некоторыми побочными явлениями, влияние которых при малых разрядных токах становится заметным: автоэлектронной эмиссией, утечками и др.

На верхнем пределе измеряемых давлений наступает такой момент, когда электрон между столкновениями

с молекулами газа в силу малой длины свободного пути не набирает энергии, достаточной для ионизации. Вследствие этого разрядный ток перестает зависеть от давления. Сопротивление разрядного промежутка $R_p = \kappa^{-1} p^{-n}$ становится значительно меньше величины балластного резистора R_b , имеющего обычно порядок 10^6 Ом. При высоких давлениях, когда общий разрядный ток перестает изменяться с давлением, в разрядном промежутке имеет место расширение ионного потока,

движущегося на катод. Плотность тока на периферии пучка растет с давлением, а в центре падает. Этот эффект можно использовать для увеличения верхнего предела измеряемых давлений путем установки дополнительного секционированного коллектора.

Наибольшее распространение получили магнетронные и инверсно-магнетронные конструкции преобразователей.

На рис. 14-18 показано устройство магнитного электроразрядного преобразователя ПММ-32-1 инверсно-магнетронного типа, измеряющего давление в диапазоне $10^{-7} - 1$ Па. Электродная система преобразователя состоит из анода 1 — центрального стержневого электрода, являющегося продолжением одного из вводов, и катода. Роль катода выполняет цилиндрический магнит 3 с полюсными наконечниками 4.

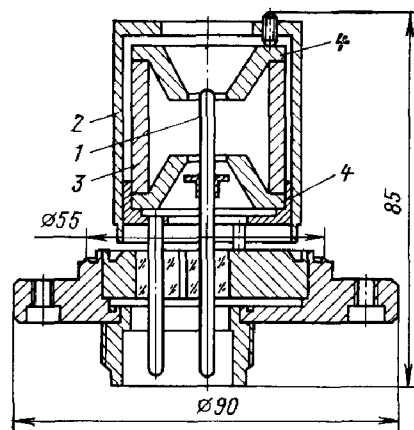


Рис. 14-18. Магнитный электроразрядный преобразователь ПММ-32-1. 1 — анод; 2 — экран; 3 — цилиндрический постоянный магнит; 4 — полюсные наконечники.

Магнит 3 имеет индукцию в зазоре полюсных наконечников $4 \cdot 10^{-10} - 0,11$ Тл. На анод подается напряжение 2500 В через балластный резистор 1,1 МОм. Полезный сигнал — разрядный ток измеряется в цепи катода.

Режим работы преобразователя (индукция магнитного поля, напряжение на аноде) подобран так, что зависимость $I_p = f(p)$ близка к линейной, т. е. показатель степени n в уравнении (14-19) остается постоянным для разных экземпляров преобразователей и равен приблизительно единице. Чувствительность преобразователя ПММ-32-1 в указанном режиме составляет $2,2 \cdot 10^{-2}$ А/Па.

Преобразователь ПММ-32-1 работает в комплекте с вакуумметром ВМБ-8 или ВМЦБ-12 с цифровым выходом.

Для измерения предельно низких давлений вплоть до 10^{-11} Па разработан вакуумметр ВММ-2 с преобразователем ПММ-14М, который показан на рис. 14-19.

Электродная система преобразователя состоит из цилиндрического катода 1, экрана 2 и проволочного анода 3. Ток, протекающий через катод, который также является коллектором ионов, пропорционален величине измеряемого давления. Вдоль оси электродной системы магнитом 4 создается магнитное поле значительной индукции до 0,18 Тл. На анод преобразователя через балластный резистор 5 МОм подается постоянное напряжение 6 кВ.

Для предотвращения тока автоэлектронной эмиссии в цепи катода под влиянием электрического поля большой напряженности на краях отверстий в торцевых пластинах анод окружен заземленным экраном 2. Автоэлектронный ток создавал бы фон, ограничивающий нижний предел измерения давления. Заземленный экран своими втулками входит между анодом и краями торцевых пластин катода. Возникающая со втулок экрана автоэлектронная эмиссия не регистрируется в цепи катода и играет положительную роль как источник электронов, облегчающих зажигание разряда в преобразователе при низких давлениях. Втулка экрана имеет на концах шайбы, края которых еще ближе расположены к аноду и увеличивают автоэлектронную эмиссию.

Преобразователь ПММ-14М допускает прогрев до 820 К при обезгаживании, однако магнит при прогреве во избежание размагничивания рекомендуется сни-

мать. Магнит следует снимать также при прогреве катода электронной бомбардировкой, поскольку магнитное поле затрудняет выход электронов с нити и тем самым снижает величину анодного тока, т. е. степень прогрева.

Преобразователь ПММ-14М имеет чувствительность по азоту $3 \cdot 10^{-3}$ А/Па. Градуировка преобразователей

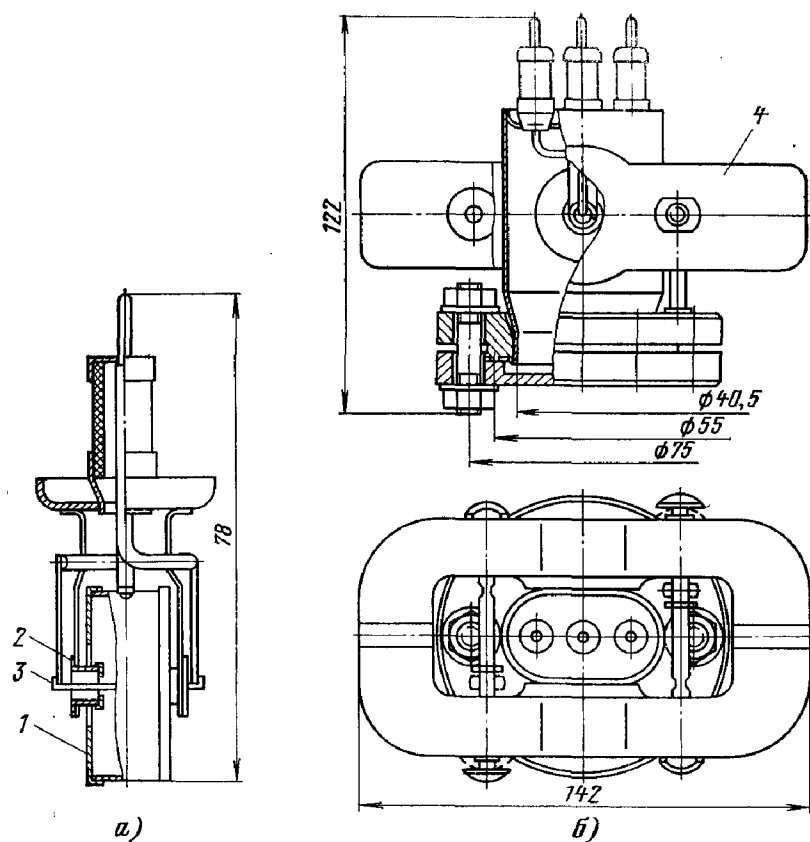


Рис. 14-19. Магнитный электроразрядный преобразователь ПММ-14М. а — электродная система; б — общий вид.

по некоторым газам показала, что показатель степени для всех газов остается практически постоянным, но чувствительность k различна. Коэффициенты относительной чувствительности близки к аналогичным коэффициентам электронных ионизационных преобразователей (см. приложение 12).

Нижний предел давлений, измеряемых инверсно-магнетронными преобразователями, определяется способностью их усилителей измерять малые ионные токи.

В инверсно-магнетронных преобразователях при давлениях больше 10^{-5} Па появление разрядного тока в датчике происходит в течение не более 1 мин. При более низких давлениях время возникновения разряда значительно увеличивается, иногда до 1 ч. Кратковременное повышение давления в преобразователе, прогрев анода в течение нескольких секунд прямым пропусканием тока или искра от искрового течеискателя значительно облегчают возникновение разряда. Надо заметить, что инверсно-магнетронные преобразователи обладают своего рода разрядной «памятью». На весьма низких давлениях повторное включение преобразователя после небольшого перерыва в работе приводит к почти мгновенному возникновению разряда.

Самоочищающиеся преобразователи. Магнитные электроразрядные вакуумметры, обладая рядом достоинств — механической прочностью, возможностью работы на металлических вакуумных системах, высокой чувствительностью, имеют существенный недостаток — способность к загрязнению. Особенно интенсивное загрязнение магнитного электроразрядного преобразователя наблюдается при его использовании в вакуумных системах, оснащенных паромасляными диффузионными насосами.

Газовый разряд в преобразователе при значительных энергиях ионов и электронов до 2—3 кэВ сопровождается расщеплением высокомолекулярных компонентов газовой среды, попадающих из паромасляного насоса. Молекулы масла, поляризуясь и расщепляясь в разряде, создают на электродах манометрического преобразователя пленки, которые искажают, а со временем и вовсе срывают работу преобразователя. В результате срок службы преобразователей в системах с паромасляными диффузионными насосами снижается до десятков часов. Химическая, а особенно механическая очистка разборного преобразователя не исключает возможность последующего искажения результатов измерений. Ионная бомбардировка отрицательного электрода (катода — коллектора ионов), наоборот, очищает его. Использование ионной бомбардировки для очистки электродов требует изменения конструкции манометрического преоб-

разователя таким образом, чтобы обеспечивалось горение разряда в оба полупериода питания переменным напряжением.

Для работы в системах с повышенным содержанием высокомолекулярных соединений разработан электро-разрядный самоочищающийся преобразователь ПММ-28,

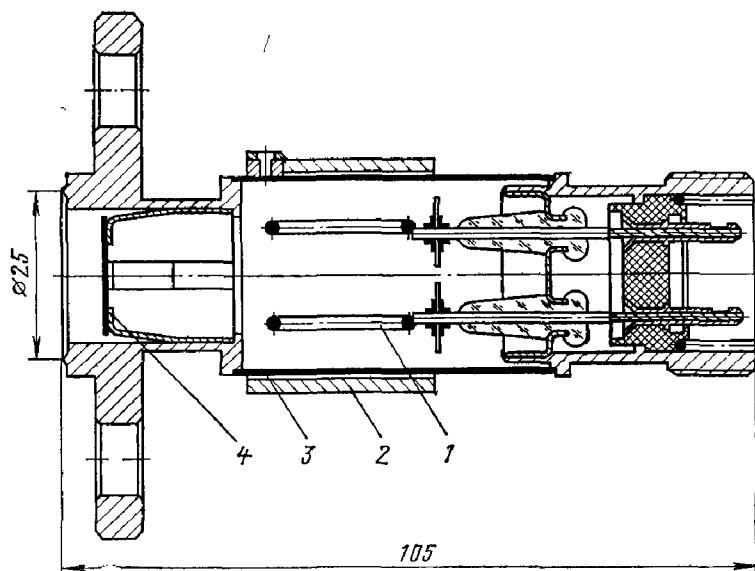


Рис. 14-20. Самоочищающийся преобразователь ПММ-28.

1 — кольцевой электрод; 2 — постоянный магнит; 3 — прямоугольная камера; 4 — механический маслоотражатель.

работающий с вакуумметром ВЭМБ-1 [13]. В прямоугольной камере 3 преобразователя ПММ-28 (рис. 14-20) установлены два электроизолированных кольцевых электрода 1. На камеру надет постоянный магнит 2. В патрубке преобразователя установлен маслоотражатель 4. Принципиальная электрическая схема питания преобразователя ПММ-28 показана на рис. 14-21.

На центральные кольцевые электроды подается в противофазе переменное напряжение от повышающего трансформатора T_1 . Средняя точка трансформатора T_2 через измерительный прибор M_1 соединяется с корбчатый коллектором преобразователя — его корпусом. Во вторичную обмотку трансформатора T_2 включен измерительный прибор M_2 , позволяющий измерять переменный ток в цепи между кольцевыми электродами.

Распределение потенциалов между электродами преобразователя таково, что в каждый полупериод напряжения между кольцевым электродом и ближней к нему пластиной коллектора создается соотношение электрического и магнитного полей, характерное для манометрического преобразователя Пеннинга. В резуль-

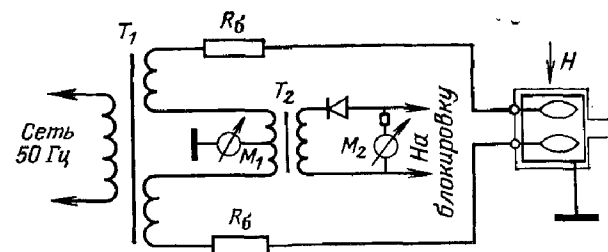


Рис. 14-21. Принципиальная электрическая схема включения самоочищающегося преобразователя ПММ-28.

тате в каждой полупериод, состоящей из одной стенки корпуса и кольцевого электрода (анода), горит разряд. Образующиеся ионы частично уходят на коллектор, а частично на другой кольцевой электрод, находящийся под большим отрицательным потенциалом, т. е. в каждый полупериод одно из колец работает как анод, а другое подвергается сильной ионной бомбардировке и, следовательно, очистке. Наиболее эффективная очистка имеет место при давлении 10^{-1} —1 Па.

С увеличением давления происходит перераспределение разряда. Разрядный ток между коллектором и кольцевым анодом при давлениях выше 1 Па остается постоянным, а ток между кольцевыми электродами продолжает расти.

На рис. 14-22 показаны градуировочные кривые вакуумметра.

При измерении давления в широком диапазоне удобно пользоваться прибором M_2 и измерять переменный ток в цепи кольцевых электродов. Однако при низких давлениях становятся существенными емкостные токи. Измерение выпрямленного разрядного тока в цепи общего коллектора по прибору M_1 в диапазоне низких давлений дает более достоверный отсчет, так как емкостные токи в этом случае не влияют на результаты

измерений. В практической схеме используется один прибор с соответствующей коммутацией.

Вакуумметр ВЭМБ-1 обеспечивает измерение давления в диапазоне 10^{-3} — 10^2 Па. Диапазон давлений блокировки составляет 10^{-2} — 10^2 Па.

Электроразрядный вакуумметр-течеискатель. При проведении технологических работ часто требуется не

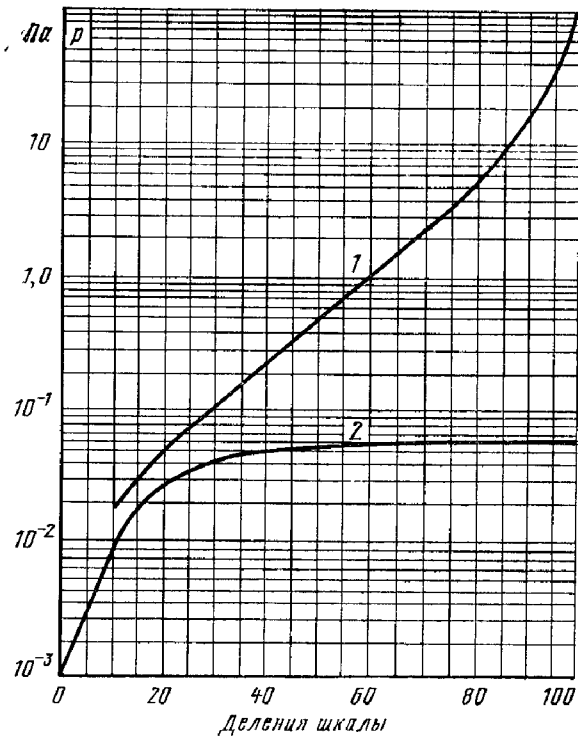


Рис. 14-22. Градуировочные кривые преобразователя ПММ-28.

1 — при измерении переменного тока в цепи кольцевых электродов; 2 — при измерении постоянной составляющей разрядного тока.

только измерять давление, но и быть убежденным в герметичности обрабатываемого изделия и вакуумной системы. Применение для этой цели вакуумметров всегда привлекало своей простотой. В этом случае используется отклонение отсчета в связи с разной чувствительностью манометрических преобразователей к пробным газам. Применение обычных ионизационных вакуумметров позволяет оценить лишь относительно грубые течи, большие 10^{-3} — 10^{-4} м³·Па/с (Вт). Причина столь низ-

кой чувствительности манометрического метода течеискания заложена в самом принципе: в необходимости измерения небольшой разности сигналов на фоне относительно большого сигнала. Масс-спектрометрические методы течеискания дают резкое увеличение чувствительности за счет селективного выделения положительных ионов пробного газа. Однако эти приборы сложны, дороги в эксплуатации и не на каждой установке их применение целесообразно и экономически оправдано.

Простой и достаточно чувствительный способ течеискания может быть реализован при использовании электроотрицательных ионов некоторых сложных газов, которые образуются путем захвата электрона молекулой газа. Максимальная вероятность захвата электрона зависит от энергии электронов и соответствует для разных газов энергиям от 0,1 до 1,0 эВ. Наиболее легко электроотрицательные ионы образуют газы, молекулы которых имеют сродство к электрону: сернистые соединения, галогидсодержащие соединения (фреоны) и кислород.

На рис. 14-23 показано поперечное сечение взаимодействия электрона с молекулой шестифтористой серы SF₆ до образования электроотрицательного иона (вероятность ионизации) в зависимости от энергии электронов.

Электроны малых энергий, необходимых для эффективной ионизации, как раз определяют процессы в магнетронных манометрических приборах. Сочетание скрещенных значительного магнитного поля и относительно небольшого электрического поля позволяет электронам даже небольших энергий (порядка 0,1 эВ) проходить значительные расстояния благодаря движению по эллипсоиду, что обеспечивает эффективную ионизацию газов и образование электроотрицательных ионов. Ионы

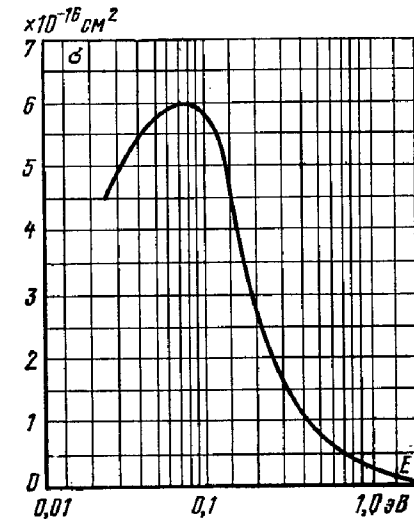


Рис. 14-23. Зависимость поперечного сечения взаимодействия электрона с молекулой SF₆ до образования электроотрицательного иона от энергии электронов.

от места своего образования до анода двигаются практически по прямой.

На рис. 14-24 показана конструкция магнитного электроразрядного преобразователя ПММ-42 магнетронного типа, обеспечивающего наряду с контролем давления обнаружение негерметичности по току электроот-

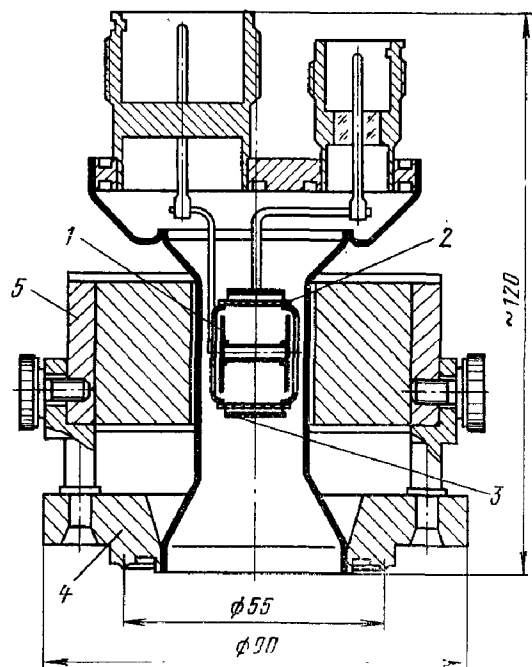


Рис. 14-24. Магнитный электроразрядный преобразователь ПММ-42.

1 — катод; 2 — сетка; 3 — анод; 4 — фланец; 5 — магнит.

рицательных ионов. Преобразователь состоит из расположенного по оси катода 1, сетки 2 и анода 3. Электродная система смонтирована на манометрическом фланце 4. Снаружи ее охватывает подковообразный магнит 5 с индукцией 0,10—0,11 Тл в зазоре. Сетка соединена с корпусом прибора. Катод и анод имеют выводы для измерения тока в их цепях. На катод преобразователя через резистор 1 МОм подается напряжение минус 2,5 кВ.

Сетка 2, находящаяся под тем же потенциалом, что и анод 3, улавливает электроны, но пропускает на анод

электроотрицательные ионы. Принципиальная электрическая схема включения преобразователя ПММ-42 показана на рис. 14-25. По разрядному току в цепи катода можно судить об общем давлении, а по току в цепи анода — о парциальном давлении электроотрицательных газов.

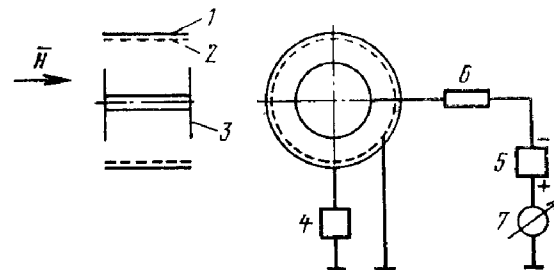


Рис. 14-25. Принципиальная электрическая схема питания преобразователя ПММ 42.

1 — коллектор; 2 — сетка; 3 — катод; 4 — измеритель тока электроотрицательных ионов; 5 — источник высокого напряжения; 6 — балластный резистор; 7 — измеритель тока в цепи катода.

В качестве пробных газов рекомендуется использовать шестифтористую серу SF_6 или фреон-12 Cl_2F_2 . Эти газы достаточно эффективно образуют отрицательные ионы и практически отсутствуют в атмосфере.

На рис. 14-26 показаны градуировочные кривые вакуумметра-течекскаателя ВТИ-1, работающего с преобразователем ПММ-42. Из графика видно, что с ростом давления азота пропорционально увеличивается катодный ток, в то время как ток в цепи анода практически не изменяется. При напуске SF_6 токи анода и катода растут пропорционально давлению.

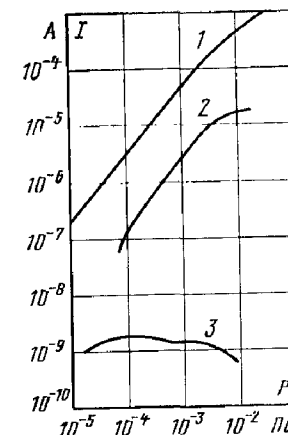


Рис. 14-26. Градуировочные кривые вакуумметра-течекскаателя ВТИ-1.

1 — зависимость разрядного тока в цепи катода от давления азота; 2 — зависимость тока электроотрицательных ионов от давления SF_6 ; 3 — значение фонового тока в цепи анода, обусловленного прохождением электронов повышенных энергий сквозь сетку преобразователя.

В табл. 14-3 приведена чувствительность вакуумметра-течешкателя ВТИ-1 к некоторым газам.

Таблица 14-3

Чувствительность вакуумметра ВТИ-1 к некоторым газам— минимальное парциальное давление газов в процентах, которое вакуумметр может зарегистрировать при данном общем давлении азота p

Газ	Давление p , Па			
	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
SF_6	0,05	0,025	0,014	—
CCl_2F_2	0,013	0,008	0,0011	—
CCl_4	0,05	0,04	0,0014	0,001

Вакуумметр-течешкатель ВТИ-1 позволяет измерять общее давление газа в диапазоне 10^{-5} — 10^{-2} Па и индцировать содержание пробного газа с чувствительностью до $10^{-3}\%$ от общего давления. При скорости откачки в районе установки преобразователя ПММ-42 10^{-1} л/с возможно индцирование течей величиной до 10^{-10} м³·Па/с.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ

15-1. КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ

При работе на высоковакуумных установках часто необходимо знать не только общее давление разреженного газа, но и его парциальный состав. Для выявления парциального состава газа служат газоанализаторы. Основные требования, которым должны удовлетворять высоковакуумные газоанализаторы— это малое собственное газовыделение и высокая чувствительность. Требуемая разрешающая способность таких приборов обычно невелика (от 20 до 50), так как в состав остаточных газов входят в основном легкие газы. В данной главе рассматриваются газоанализаторы, используемые для определения парциального состава газов при давлениях ниже 10^{-2} Па.

По принципу действия почти все применяемые высоковакуумные газоанализаторы— масс-спектрометриче-

ские [1, 23, 71, 87]. В приборах этого типа анализируемый газ ионизируется. Образовавшиеся положительные ионы разделяются по характерному для каждого из них массовому числу— отношению массы иона к его заряду M/e . Для однозарядных ионов массовые числа совпадают с их молекулярными массами (в целых числах). После разделения ионы поступают на коллектор и дают в его цепи ток, пропорциональный давлению. Датчик масс-спектрометрического газоанализатора состоит из трех узлов: источника ионов, анализатора и приемника ионов.

По способу разделения ионов в анализаторе высоковакуумные газоанализаторы классифицируются на две большие группы.

1. Статические масс-спектрометры, в которых разделение ионов осуществляется с помощью постоянных или медленно изменяющихся магнитного и электрического полей, причем период изменения полей много больше времени движения ионов в анализаторе.

2. Динамические масс-спектрометры, в которых разделение ионных пучков или пакетов производится в изменяющемся во времени электрическом поле, период изменения которого соизмерим со временем движения ионов в анализаторе.

Вместе с этим принята классификация масс-спектрометров по основному принципу действия:

1) магнитные:

масс-спектрометр с разделением и фокусировкой ионов с помощью магнитного поля;
циклоидальный масс-спектрометр (трохотрон);

2) времяпролетные, у которых разделение ионов в анализаторе происходит во время пролета. Масс-спектрометры этого типа носят название также импульсных масс-спектрометров или хронотронов;

3) радиочастотные масс-спектрометры:

резонансный радиочастотный масс-спектрометр с магнитным полем (омегатрон);
квадрупольный (электрический фильтр масс) и монополярный масс-спектрометры;
радиочастотный масс-спектрометр (фарвитрон);
радиочастотный масс-спектрометр (топатрон).

Кроме масс-спектрометрических газоанализаторов, известны десорбционный спектрометр, в котором измеряется давление газов, десорбирующихся с нити при

повышении ее температуры, а также приборы для контроля парциального давления отдельных компонентов газовой смеси.

Основным параметром газоанализатора является его *чувствительность*, которая выражает минимально определяемое парциальное давление газа. Чувствительность зависит от характеристик датчика и возможностей измерительной схемы. Чувствительность масс-спектрометров, как и вакуумметрических датчиков, может быть выражена в 1/Па или А/Па. Для статических масс-спектрометрических приборов чувствительность часто выражается в долях процента и показывает, какую долю отдельного компонента в общем составе газа способен обнаружить данный прибор. Принципиально чувствительность масс-спектрометрических газоанализаторов различна для разных газов. Чтобы избежать дополнительных ошибок, связанных с переводом отсчета в парциальные давления, запись компонентов нередко производится непосредственно в единицах тока или напряжения, а их соотношение характеризует относительный состав анализируемого газа.

Следующим параметром высоковакуумных газоанализаторов является их *разрешающая способность*, которая для масс-спектрометрических приборов представляет собой отношение массового числа M к наименьшему различаемому изменению массового числа ΔM .


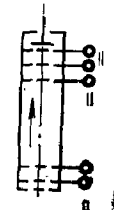
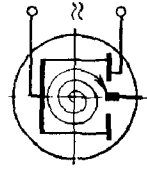
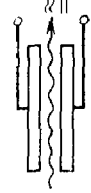
Наибольшую разрешающую способность имеют стационарные статические масс-спектрометры с магнитным разделением ионного луча.

Не менее важным параметром прибора является *диапазон анализируемых газов*, для масс-спектрометрических газоанализаторов — *диапазон анализируемых масс*. Для вакуумных измерений достаточен диапазон масс от 2 до 50—100 (органические соединения, продукты расщепления вакуумного масла), а при применении ртути — до 200.

Диапазон рабочих давлений всех масс-спектрометров ограничен по существу одними и теми же причинами. Нижняя граница рабочего диапазона определяется трудностью выделения небольшого пика рабочего газа над фоновым отсчетом. Верхняя граница рабочего диапазона определяется отклонением от линейного закона зависимости амплитуды тока ионов рабочего компонента от давления.

Таблица 15-1

Основные характеристики высоковакуумных масс-спектрометрических газоанализаторов

№	Тип прибора	Принципиальное устройство анализатора	Метод разделения ионов	Разрешающая способность $M/\Delta M$	Рабочий диапазон давлений, Па	Диапазон анализируемых масс	Основное назначение и применение
	Статический масс-спектрометр с магнитной разветкой		В постоянных электрическом и магнитном полях	30 и более	$10^{-2} - 10^{-9}$	1 и более	Количественный анализ. Масс-спектрометрические теческательи
	Времяпролетный масс-спектрометр (хроногрон)		Во время пролета за счет разницы скоростей	100	$10^{-2} - 10^{-8}$	1—600	Исследование газовой кинетики. Большие вакуумные системы
	Омегагронный измеритель парциальных давлений		В постоянном магнитном и переменном электрическом полях	40	$10^{-2} - 10^{-9}$	1—250	Измерение парциальных давлений. Вакуумные системы откачных насосов и других технологических установок. Электровакuumные и другие вакуумные приборы
	Кварцупольный и монополярный масс-спектрометры		В переменном электрическом поле	$\geq M$	$10^{-2} - 10^{-10}$	1—300	То же

В табл. 15-1 приведены основные характеристики и рекомендуемые области применения масс-спектрометров, использующихся в вакуумной технике.

15-2. СПЕКТР МАСС И ЕГО РАСШИФРОВКА

На рис. 15-1 изображена спектрограмма одного из масс-спектрометров, на которой показана зависимость выходного сигнала газоанализатора I_i от массового числа M/e некоторых газов. Масс-спектрограмма получена при плавной непрерывной развертке по массам и записи выходного сигнала.

Амплитуды пиков ионных токов, показанных на рис. 15-1, пропорциональны парциальным давлениям

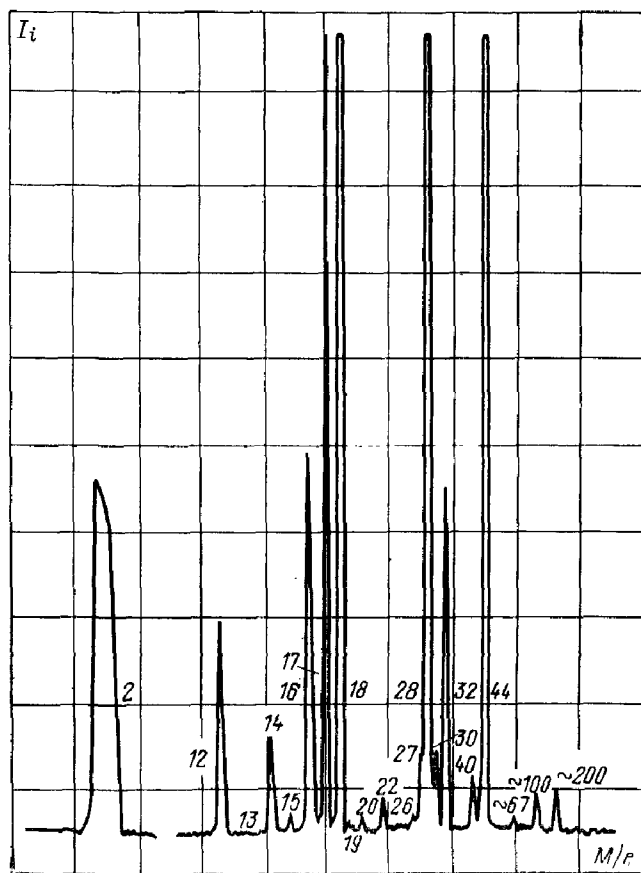


Рис. 15-1. Спектр масс.

отдельных компонентов, ионизирующему электронному току и чувствительности газоанализатора к соответствующему компоненту.

В масс-спектрометрах, например в омегатронном, пики ионов определенных массовых чисел выделяются над уровнем небольшого флюктуационного фонового тока. Фоновый ток имеет место из-за многих причин: рассеяния ионов в камере анализатора, недостаточной фокусировки электронного и ионного потоков, нестабильности питания, наводок, шумов в цепи усиления и др. Понятно, что отсчет величины пика производится от среднего уровня фона.

Относительная чувствительность масс-спектрометрических газоанализаторов к разным газам пропорциональна вероятности ионизации газов и практически совпадает с относительной чувствительностью ионизационных манометрических преобразователей (см. приложение 12).

В табл. 15-2 приведены соотношения пиков основных компонентов масс-спектров газов и паров, наиболее часто встречающихся в вакуумной технике. Цифровые данные весьма приближительны и зависят от многих причин.

Развертка по массовым числам выделяет пики, которые характеризуются отношением массы иона к его заряду.

В спектре доминируют однозарядные ионы, хотя наряду с ними имеются двухзарядные, массовое число которых вдвое меньше их молекулярной массы. Например, наряду с однозарядным ионом аргона с молекулярной массой и массовым числом 40 присутствует двухзарядный ион аргона с массовым числом 20.

Компоненты, состоящие из нескольких изотопов, дают соответственно пики отдельных изотопов в их количественном соотношении.

Вид спектра, кроме того, зависит от типа газоанализатора. Пики ионных токов циклоидального масс-спектрометра имеют крутой фронт. В спектре фарвитрона пики имеют острые вершины и относительно широкие основания. В этом же приборе, помимо пиков сопутствующих ионов, имеются резонансные пики, дублирующие основные на кратных частотах, что, естественно, затрудняет расшифровку парциального состава газа.

Спектральные характеристики некоторых газов и паров

Газ	Формула	Ион	Массовое число	Относительная величина пика
Водород	H ₂	H ₂ ⁺	2	1
		H ⁺	1	0,06
		H ₃ ⁺ + HD ⁺	3	≤0,01
Гелий	He	He ⁺	4	1
Неон	Ne	Ne ⁺	20	1
		Ne ⁺	22	0,10
Азот	N ₂	N ₂ ⁺	28	1
		N ₂ ⁺⁺ + N ⁺	14	0,08
		(N ¹⁴ N ¹⁵) ⁺	29	0,01
Кислород	O ₂	O ₂ ⁺	32	1
		O ₂ ⁺⁺ + O ⁺	16	0,10
Аргон	Ar	Ar ⁺	40	1
		Ar ⁺⁺	20	0,15
		Ar ⁺	36	0,004
Криптон	Kr	Kr ⁺	84	1
		Kr ⁺	86	0,33
		Kr ⁺	82	0,20
		Kr ⁺	83	0,20
		Kr ⁺⁺	42	0,19
		Kr ⁺⁺	43	0,06
		Kr ⁺⁺	41	0,04
		Kr ⁺⁺	41,5	0,04
Ртуть	Hg	Hg ⁺	200	1
		Hg ⁺⁺	100	0,5—0,7
Вода	H ₂ O	H ₂ O ⁺	18	1
		OH ⁺	17	0,3
		O ⁺	16	0,02
		H ₂ ⁺	2	0,01
Окись углерода	CO	CO ⁺	28	1
		O ⁺	16	0,13
		C ⁺	12	0,03
		C ¹³ O ⁺	29	0,01

Газ	Формула	Ион	Массовое число	Относительная величина пика
Двуокись углерода	CO ₂	CO ₂ ⁺	44	1
		CO ⁺	28	0,12
		O ⁺	16	0,08
		C ⁺	12	0,04
Метан	CH ₄	CH ₄ ⁺	16	1
		CH ₃ ⁺	15	0,80
		CH ₂ ⁺	14	0,14
		CH ⁺	13	0,06
		C ⁺	12	0,02
Ацетилен	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂ ⁺	26	1
		C ₂ H ⁺	25	0,20
		C ₂ ⁺	24	0,05
		CH ⁺	13	0,04
		H ₂ ⁺	2	0,04
Этилен*	C ₂ H ₄	C ₂ H ₄ ⁺	28	1
		C ₂ H ₃ ⁺	27	0,50
		C ₂ H ₂ ⁺	26	0,50
Этан	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄ ⁺	28	1
		C ₂ H ₃ ⁺	27	0,28
		C ₂ H ₅ ⁺	30	0,26
		C ₂ H ₅ ⁺	29	0,20
		C ₂ H ₂ ⁺	26	0,18
		C ₂ H ₆ ⁺⁺ + CH ₃ ⁺	15	0,03
		C ₂ H ⁺	25	0,03
		C ₂ H ₄ ⁺ + CH ₂ ⁺	14	0,02

Газ	Формула	Ион	Массовое число	Относительная величина пика
Пропан**	C_3H_8	$C_2H_5^+$	29	1
		$C_2H_4^+$	28	0,60
		$C_3H_8^+$	44	0,45
		$C_2H_3^+$	27	0,40
		$C_3H_7^+$	43	0,31
		$C_3H_3^+$	39	0,20
		$C_3H_5^+$	41	0,16
Спирт этиловый***	C_2H_6O	—	31	1
		$C_2H_6O^+$	46	0,24
Ацетон	C_3H_6O	—	43	1
		$C_3H_6O^+$	58	0,36
Диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	—	31	1
		$C_4H_{10}O^+$	74	0,28

* Массовые числа 25, 29, 14, 24, 13, 12 дают пики от 0,1 до 0,01.

** Массовые числа 6, 38, 37, 15, 30, 14 дают пик от 0,1 до 0,01.

*** Большое число других пиков.

Рассмотрим некоторые общие для всех масс-спектрометрических газоанализаторов явления, влияющие на вид спектрограммы.

Электронный луч и накаленный катод производят диссоциацию сложных молекул газа на более простые составляющие, которые также ионизируются и дают в спектре соответствующие пики ионов. Например, в спектре CO_2 наблюдаются пики CO_2^+ , CO^+ , C^+ , O^+ , O_2^+ .

Пик с одним и тем же массовым числом может принадлежать разным веществам. Массовое число 16 присуще как метану CH_4^+ , так и атомарному кислороду O^+ , массовое число 28 — азоту N_2^+ и окиси углерода CO^+ . Различать их можно по наличию дополнительных пиков в масс-спектре (табл. 15-2).

Органические соединения дают большое число осколочных пиков. У сложных соединений преобладают осколочные пики, по которым можно с известной степенью приближения составить лишь представление об исходном продукте. Плохое удаление органических растворителей после мойки аппаратуры дает наибольший пик для этилового спирта и диэтилового (серного) эфира в районе 31-й, а для ацетона — в районе 43-й массы.

Минеральные масла диффузионных насосов дают серии пиков углеродсодержащих соединений, начиная с метановых производных до молекулярной массы самих масел. Наибольшие по амплитуде пики соответствуют, как правило, этан-пентановым производным (2—5 углеродных атомов).

Наличие кислорода в спектре остаточных газов герметичных высоковакуумных систем не характерно. Кислород со всегда имеющимся в приборе углеродными загрязнениями дает преимущественно CO (массовое число 28), CO_2 (массовое число 44). Патекание воздуха через течь дает параллельный рост пиков азота (массовое число 28), кислорода (массовое число 32) и аргона (массовое число 40).

После установки рабочего режима газоанализатора проводится его градуировка, заключающаяся в определении чувствительности прибора к разным газам. В систему с датчиком газоанализатора последовательно напускается ряд известных газов. При нескольких значениях давления впускаемого газа определяется чувстви-

тельность — отношение приращения выходного сигнала газоанализатора к соответствующему приращению давления данного газа. Давление газа в диапазоне 10^{-2} — 10^{-8} Па наиболее удобно определять по ионизационному вакуумметру. Определив указанным образом среднюю чувствительность масс-спектрометрического газоанализатора по одному газу, можно (см. приложение 12) подсчитать его ориентировочную относительную чувствительность для некоторых других газов.

Одновременно отмечаются места пиков ионов данного газа на масс-спектрограмме (хронотрон) или рабочие параметры: частота — для омегатрона, напряжение — для электрического фильтра масс, при которых на коллектор масс-спектрометра поступают ионы с данным массовым числом. Дополнительно можно отметить положение или рабочие параметры для некоторых характерных пиков ионов: паров воды (массовые числа 18 и 17) в непрогретой системе, водорода (массовое число 2) в системе с паромасляным насосом, ртути (массовое число 200) в системе с парортутным насосом. Зная местоположение или рабочие параметры прибора для пиков ионов с известными массовыми числами, можно определить места появления или рабочие параметры пиков ионов с другими массовыми числами.

15-3. СТАТИЧЕСКИЕ МАСС-СПЕКТРОМЕТРЫ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ИОНОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Широко распространенные масс-спектрометры с разделением ионов в магнитном поле представляют собой стационарные приборы, предназначенные для анализа газов, паров, жидкостей, твердых веществ и выявления их относительного содержания в газовой смеси.

Так, например, основным элементом гелиевых высокочувствительных теческателей является масс-спектрометр с разделением ионов в постоянном магнитном поле.

Статические масс-спектрометры серии МХ предназначаются для химического анализа, серии МИ — изотопного, серии МВ относятся к приборам с весьма высокой разрешающей способностью.

Для целей измерения парциальных давлений в сверхвысоком вакууме принципиально может быть использован любой из них. Статический масс-спектрометр про-

ще, чем остальные, но и к нему предъявляется ряд специфических требований: прежде всего датчик не должен влиять на парциальный состав газовой смеси, должен иметь высокую проводимость между источником и обследуемой средой, малый объем и возможность обезгаживания. Принципиальное устройство камеры статических масс-спектрометров показано на рис. 15-2.

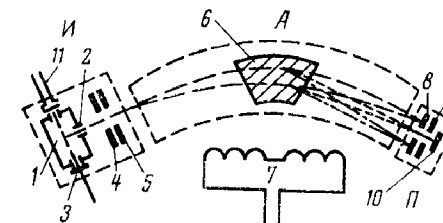


Рис. 15-2. Принципиальная схема рабочей части камеры масс-спектрометра с отклонением ионного луча в магнитном поле.

И — источник ионов; А — анализатор; П — приемник ионов; 1 — коробка; 2 — выходная щель; 3 — коллектор электронов; 4 — вытягивающая пластина; 5 — направляющие пластины; 6 — полюсный наконечник электромагнита; 7 — обмотка электромагнита; 8 — входная щель; 9 — супрессор; 10 — коллектор ионов; 11 — катод.

В источнике ионов И ионизация газов производится моноэнергетичным пучком медленных электронов, эмитируемых накаленным катодом 11. Часть образовавшихся при ионизации положительных ионов вытягивается из ионизатора через узкую щель 2, ускоряется и дополнительно фокусируется полем установленных рядом пластин 4, 5 так, что на выходе из источника ионы движутся весьма узким пучком. Все ионы имеют одну и ту же энергию $U_{\text{уск}}$, но разные скорости $u_{\text{и}}$ в соответствии с их массой m и зарядом e :

$$u_{\text{и}} = \sqrt{\frac{2U_{\text{уск}}}{m/e}} \quad (15-1)$$

Попадая в зону действия магнита 6, поле которого перпендикулярно направлению движения частиц, ионы изменяют направление своего движения под влиянием лоренцевой силы. Радиус траектории ионов r , движущихся в однородном магнитном поле с напряженностью H , равен:

$$r = \frac{m}{e} \frac{u_{\text{и}}}{H}, \quad (15-2)$$

или

$$r = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{2m}{e} U_{\text{уск}}} \quad (15-3)$$

Изменяя ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}}$ или напряженность магнитного поля H , можно последовательно направить во входную щель приемника ионы разных масс. В выпускаемых масс-спектрометрах применяется преимущественно магнитное разделение ионов по массовым числам. В приборах с большой разрешающей способностью используется неоднородное магнитное поле. Угол между направлениями ионного потока в выходной щели 2 и входной щели 8 характеризует угол развертки анализатора. Обычно угол развертки газоаналитических масс-спектрометров имеет величину 90, 120 или 180°.

Давление в камере анализаторов во избежание рассеяния ионов из-за столкновения с молекулами газа должно быть не выше 10^{-3} Па.

Коллектор 10 в приемнике ионов устанавливается за узкой щелью. Чем уже входная щель, тем более узкий пучок ионов отбирает коллектор без смещения с потоком ионов ближайшей массы, но тем меньше и токи в цепи коллектора. Почти всегда в масс-спектрометрах с магнитным разделением ионов применяются сменные или регулируемые по ширине диафрагмы приемника ионов.

Ионный ток коллектора усиливается электрометрическим усилителем или электронным умножителем и измеряется стрелочным прибором. При необходимости усиленный сигнал подается для записи на самопишущий потенциометр.

15-4. ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР

Работа времяпролетного масс-спектрометра основана на разделении ионов по времени пролета в свободном от электрических и магнитных полей пространстве. Времяпролетный масс-спектрометр часто называют также импульсным масс-спектрометром или хронотроном.

Принципиальное устройство камеры — датчика прибора приведено на рис. 15-3. Источник ионов I выдает в анализатор — пространство дрейфа A пачки ионов. Пачку ионов можно получить как импульсной ионизацией электронным потоком длительностью 10^{-7} — 10^{-6} с,

так и подачей на выталкивающий электрод или вытягивающую диафрагму импульса напряжения той же длительности при постоянном электронном потоке. Пройдя ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}}$, ионы движутся в анализаторе в сторону коллектора ионов 1 по инерции, при этом скорость движения отдельных ионов зависит от их энергии и массового числа. Время пролета ионов t

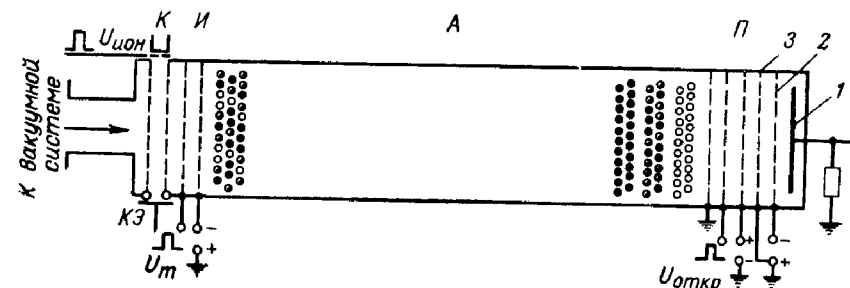


Рис. 15-3. Камера времяпролетного масс-спектрометра. I — источник ионов; A — анализатор ионов — пространство дрейфа; $П$ — приемник ионов; K — катод; $КЭ$ — коллектор электронов; 1 — коллектор ионов; 2 — антидинаatronная сетка; 3 — супрессорная сетка; \circ — ионы с массой M_1 ; \bullet — ионы с массой M_2 ; \bullet — ионы с массой M_3 ; $M_1 < M_2 < M_3$.

от источника I до приемника ионов $П$ вдоль всего пространства дрейфа A длиной l определяется из уравнения

$$t = l \sqrt{\frac{m}{e} \frac{1}{2U_{\text{уск}}}} \quad (15-4)$$

В анализаторе по мере продвижения от источника до коллектора ионы разделяются на группы в соответствии с их массовым числом. Первыми достигнут коллектора легкие ионы и за ними последовательно группы более тяжелых ионов. Попадая на коллектор 1, группы ионов создают в его цепи ток, пропорциональный числу ионов, т. е. парциальному давлению. Усиленный сигнал подается на катодный осциллограф, частота развертки которого синхронна с частотой повторения ионизирующих импульсов.

В приемнике ионов перед коллектором 1 обычно устанавливается система сеток, ближайшая из которых к коллектору является антидинаatronной (сетка 2). Остальные сетки позволяют при необходимости из всего потока ионов отбирать и пропускать на коллектор 1

только ионы определенного массового числа или диапазона массовых чисел. Это осуществляется подачей на сетки открывающих и закрывающих импульсов, сфазированных со временем ионизирующего импульса. Супрессорная сетка 3 не пропускает на коллектор ионы рассеяния, энергия которых ниже энергии ионов в пачке.

Разрешающая способность прибора

$$\frac{M}{\Delta M} = \frac{t}{2\Delta t}, \quad (15-5)$$

где Δt — время, в течение которого ионы данной массы проходят на приемник; это время пропорционально толщине ионных групп у коллектора ионов, которая зависит от толщины пачки на выходе источника и расширения ее во время дрейфа.

Влияние места образования иона (толщины пачки на выходе источника) на разрешающую способность прибора можно полностью устранить применением равномерного ускоряющего поля конечной длины. Подбором соотношения длины разгона иона к длине его свободного дрейфа можно синхронизировать приход ионов на коллектор независимо от места их образования в источнике. На времяпролетных масс-спектрометрах удается получать разрешающую способность до 100 и в отдельных приборах даже до 200.

Применение электронного умножителя для усиления импульсов ионного тока обеспечивает измерение давлений до 10^{-7} Па.

Отечественной промышленностью выпускается времяпролетный масс-спектрометр МСХ-4, предназначенный для анализа быстро изменяющегося состава газа в высоком вакууме. Диапазон анализируемых масс от 1 до 600, разрешающая способность прибора не менее 100. Длина пространства дрейфа ионов более 1000 мм. Длительность развертки спектра масс от 3 до 50 мкс. В секунду прибор производит от 1000 до 10 000 анализов. Для фотографирования спектра к прибору прилагается приставка с фотоаппаратом и кинокамера.

15.5. РЕЗОНАНСНЫЙ РАДИОЧАСТОТНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТР

В датчике резонансного радиочастотного масс-спектрометра (омегатроне) (рис. 15-4) используется разделение ионов газа по массовым числам во взаимно пер-

пендикулярных высокочастотном электрическом и постоянном магнитном полях. Ионизация газа происходит в тонком электронном луче, направленном от термокатода 1 через два сквозных отверстия в улавливающих пластинах 2 на коллектор электронов. Образовавшиеся ионы под воздействием высокочастотного электрического поля, приложенного между пластинами 3, и постоянного

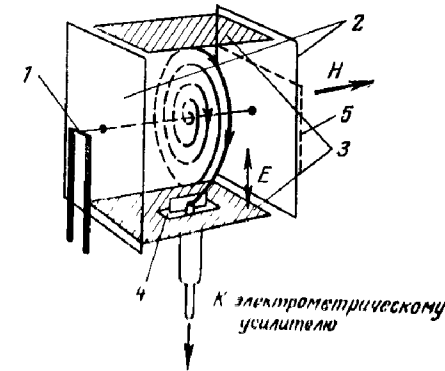


Рис. 15-4. Принципиальная схема омегатронного датчика.

1 — катод; 2 — улавливающие пластины; 3 — высокочастотные пластины; 4 — коллектор ионов; 5 — коллектор электронов; H — направление магнитного поля; E — направление электрического поля.

магнитного поля начинают движение по окружности в плоскости, перпендикулярной магнитному полю H.

Частота вращения ионов ω равна:

$$\omega = \frac{H}{|m/e|}. \quad (15-6)$$

Часть ионов, собственная частота вращения которых совпадает с приложенной между высокочастотными пластинами 3 частотой переменного напряжения, на каждом обороте приобретает дополнительную энергию от высокочастотного поля, за счет чего радиус траектории их движения увеличивается. В результате ионы, обладающие частотой вращения, совпадающей с частотой высокочастотного напряжения, движутся по спирали. Это продолжается до тех пор, пока ионы не попадут на расположенную поперек их движения пластину коллектора ионов 4. Ионы других массовых чисел, собственная частота которых отличается от частоты приложенного напряжения, затормаживаются при вращении и рекомбинируют на улавливающих пластинах 2. По току

в цепи коллектора ионов 4 можно судить о парциальном давлении резонансной массовой компоненты газа. Изменяя частоту высокочастотного напряжения, получают данные о парциальном составе всей смеси газов.

Между разрешающей способностью и массовым числом анализируемого газа M имеет место гиперболическая зависимость

$$\frac{M}{\Delta M} = \frac{1}{Mm'/e} \frac{rH^2}{2E_{\sim}} \quad (15-7)$$

или

$$M^2/\Delta M = \text{const}, \quad (15-8)$$

где r — расстояние от оси прибора (электронного луча) до коллектора ионов; m' — масса атома водорода; E_{\sim} — напряженность высокочастотного электрического поля.

Время t движения резонансного иона до коллектора ионов равно:

$$t = \frac{2rH}{E}. \quad (15-9)$$

При работе с легкими газами с малым массовым числом (массы 1—4) с целью снижения времени пребывания ионов в пространстве анализатора и сокращения траектории, т. е. уменьшения рассеяния ионов, рекомендуется подавать на пластины повышенное высокочастотное напряжение до 5 В, в то время как для остального диапазона массовых чисел достаточно 1,5 В.

Омегатрон имеет линейную зависимость ионного тока в цепи коллектора от тока электронного ионизирующего луча вплоть до 20 мкА. При высоких давлениях рекомендуется работать на малых электронных токах (2 мкА), лишь бы обеспечивалось измерение ионного тока усилителем. На низких давлениях, для того чтобы увеличить ионные токи, которые весьма малы, можно увеличить электронный ток до 10 и даже 20 мкА.

Линейная зависимость ионного тока от давления у омегатрона сохраняется вплоть до давления 10^{-3} Па. При больших давлениях она начинает искажаться вследствие рассеяния ионов при столкновениях с другими ионами или молекулами газа, поскольку длина пути иона по спирали l , равная

$$l = \frac{1}{m/e} \frac{r^2 H^2}{E}, \quad (15-10)$$

становится сопоставимой с длиной свободного пути молекул.

На рис. 15-5 показана выпускаемая промышленностью конструкция стеклянного омегатронного датчика РМО-4С. Ускорение электронов до энергии примерно 100 эВ и фокусировка их в узкий пучок осуществляются

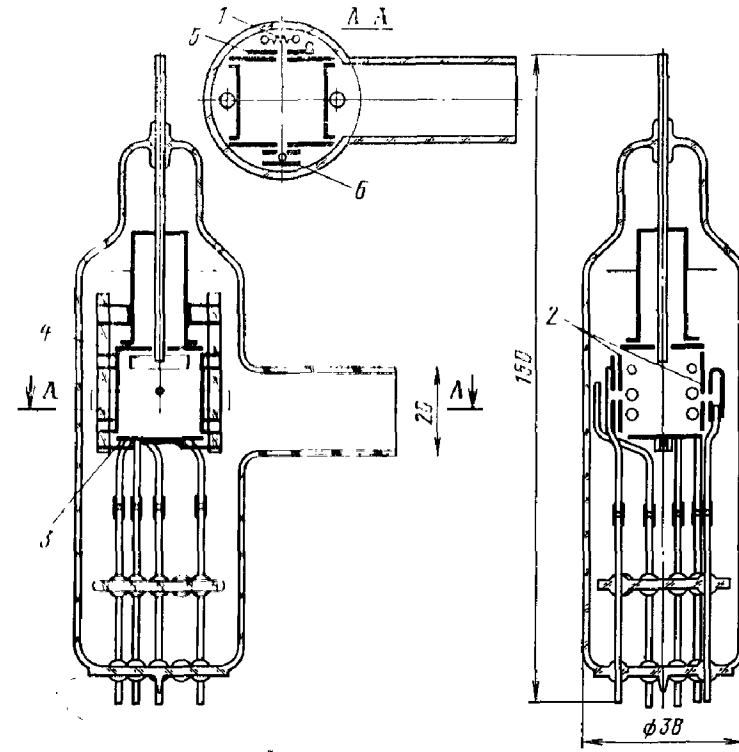


Рис. 15-5. Конструкция омегатрона РМО-4С.

1 — катод; 2 — улавливающая пластина; 3 — высокочастотная пластина; 4 — коллектор ионов; 5 — подкатодная диафрагма; 6 — коллектор электронов.

с помощью подкатодной диафрагмы 5 и отверстий в улавливающих пластинах 2. Вошедший в коробочку, образованную пластинами 2 и 3, электронный луч дополнительно фокусируется с помощью магнитного поля. Юстировка омегатрона в магнитном поле заключается в выборе такого положения магнита, когда электронный луч будет полностью проходить сквозь отверстия улавливающих пластин, не задевая их и, следовательно, не создавая в их цепи тока. Ток подкатодной диафрагмы 5 при этом должен быть минимальным. Такая юстировка

обеспечивает незначительный уровень фона в цепи коллектора ионов 4, т. е. максимальную чувствительность. Электронный луч при этом бомбардирует только коллектор электронов, рентгеновское излучение с которого не достигает коллектора ионов, т. е. не дает в его цепи фоновых токов.

Датчик РМО-4С в режиме работы прибора ИПДО-2 для массового числа 40 имеет разрешающую способность 40 и разрешает все массовые числа до 40. Иными словами, из уравнений (15-7) и (15-8) можно записать:

$$M^2/\Delta M=40^2=\text{const.}$$

В омегатроне камера ионизации является одновременно анализатором ионов. Это обеспечивает наиболее полное использование ионов, а следовательно, и высокую чувствительность омегатрона. Чувствительность омегатрона РМО-4С при настройке его на максимальный ионный ток для азота равна $(7,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$ Па⁻¹.

Для более точного определения чувствительности необходима индивидуальная градуировка прибора совместно с блоком питания. Относительная чувствительность омегатрона к разным газам практически такая же, как и для электронного ионизационного преобразователя ПМИ-2. Парциальное давление отдельного компонента определяется из уравнения (14-13).

Необходимо отметить, что при работе с газами с большими массовыми числами действительная резонансная частота высокочастотного напряжения омегатрона несколько выше расчетной из-за влияния поля улавливающих пластин и других причин.

При работе прибора в сверхвысоком вакууме предъявляются чрезвычайно высокие требования к чистоте поверхностей электродов. Загрязнение электродов, помимо искажения парциального состава газа, может привести к отклонению рабочих характеристик прибора.

При работе с паромасляными насосами электроды омегатрона достаточно быстро загрязняются и очистка прибора прогревом токами высокой частоты не всегда эффективна. В таком случае омегатрон приходится заменять новым. Восстановить свойства умеренно загрязненного парами масла омегатрона удается промывкой датчика в кипящем четыреххлористом углеороде. После этого омегатрон следует промыть горячей дистиллированной водой и осушить этиловым спиртом. Необходи-

димо отметить, что загрязнение электродов парами масла, покрытие их изолирующими пленками приводят к поляризации электродов и искажению рабочих характеристик омегатрона. Прежде всего это проявляется в появлении фона ионного тока в отсутствие высокочастотного напряжения. Если для чистого омегатрона фон при давлении 10^{-4} Па не превышает $2 \cdot 10^{-13}$ А при токе луча 10 мкА, то для загрязненного омегатрона он может возрасти в 1000 раз при тех же условиях.

Поляризация электродов приводит также к потере чувствительности за счет рассеяния ионов паразитными электрическими полями, нелинейной зависимости ионного тока от электронного луча и уменьшению разрешающей способности.

Для использования на прогреваемых металлических установках промышленностью выпускается омегатрон РМО-13 в металлокерамическом оформлении, допускающем прогрев до 900 К. К вакуумной системе прибор присоединяется с помощью манометрического фланца ДУ-50.

В омегатронах РМО-4С, РМО-13 применен вольфрамовый катод. Накаленный катод омегатронного датчика частично изменяет состав анализируемой смеси газов. Особенно сильно влияние катода сказывается при измерении парциальных давлений газов в вакуумных устройствах, изолированных от откачной системы или откачиваемых с малой скоростью.

Применение низкотемпературных боридлантановых, оксидных щелочноземельных, оксидно-иттриевых или ториевых катодов позволяет повысить точность анализа. Наиболее радикальной мерой борьбы с искажением результатов анализа является применение так называемого холодного катода, изготовленного, например, на основе пленки из окиси олова (SnO_2).

Измерения, выполненные с помощью омегатрона с оксидно-оловянным катодом, показали, что включение вольфрамового катода в среде, состоящей из окиси и двуокиси углерода, приводит к изменению парциального состава в десятки раз.

Омегатронный измеритель парциальных давлений ИПДО-2 представляет собой измерительную установку, рассчитанную на работу с омегатроном РМО-4С (РМО-13). Измерительная установка обеспечивает измерение ионного тока омегатрона и его питание, а так-

же автоматическую и ручную развертки спектра масс с его индикацией на экране электронно-лучевой трубки и записью на дополнительном самопишущем потенциометре.

Диапазон рабочих давлений ИПДО-2 составляет от 10^{-3} до $5 \cdot 10^{-9}$ Па. Прибор регистрирует газы с массовыми числами от 1 до 250.

15-6. КВАДРУПОЛЬНЫЙ И МОНОПОЛЯРНЫЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРЫ

Квадрупольный масс-спектрометр. Этот электрический фильтр масс имеет ряд преимуществ по сравнению с описанными выше анализаторами и получает все большее распространение для контроля газовой среды в вакуумных системах. Прибор способен анализировать парциальный состав газов до давлений 10^{-4} Па при достаточно высокой разрешающей способности (до 100 и более).

Принципиальная схема прибора приведена на рис. 15-6. Исследуемый газ ионизируется в источнике ионов и выталкивается в виде ионного пучка через диафрагму в пространство анализатора. Отфильтрованные в анализаторе ионы определенной массы дают в цепи коллектора 3 ток, пропорциональный давлению.

В анализаторе электрического фильтра масс разделение ионов по массам происходит за счет действия квадрупольного электрического поля, создаваемого четырьмя параллельными цилиндрическими стержнями, к которым приложены переменное напряжение $U_{\sim} \cos \omega t$ и постоянное напряжение $U_{=}$. При этом в области поперечного сечения, близкой к продольной оси прибора z , создается гиперболическое электрическое поле, потенциал которого в первом приближении выражается формулой

$$f(x, y, t) = \frac{U_{=} + U_{\sim} \cos \omega t}{r_0^2} (x^2 - y^2), \quad (15-11)$$

где r_0 — расстояние от оси z до вершины гиперболы (до стержня).

Заряженная частица,двигающаяся вдоль оси прибора z , будет раскачиваться высокочастотным полем, причем амплитуда колебаний зависит как от массового числа ионизированной частицы m , так и от величин

напряжений на стержнях. Ионы, амплитуда колебаний которых остается меньше радиуса поля r_0 , могут беспрепятственно проходить через квадрупольное поле. Можно подобрать параметры поля так, что в зависимости от подаваемого напряжения через фильтр будут проходить ионы одной определенной массы. При условии, что соотношенне амплитуд

$$\frac{U_{=}}{U_{\sim}} \leq 0,167, \quad (15-12)$$

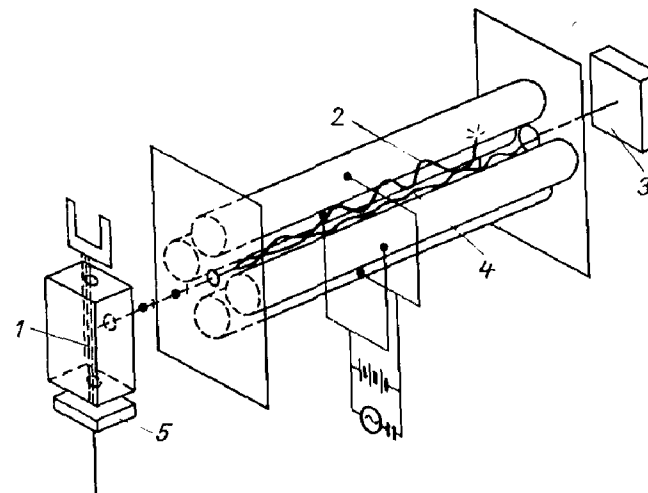


Рис. 15-6. Принципиальная схема квадрупольного масс-спектрометра.

1 — ионизирующий пучок электронов; 2 — траектория раскачиваемого иона; 3 — коллектор ионов; 4 — траектория нераскачиваемого иона; 5 — коллектор электронов.

массовое число M прошедших через фильтр ионов определяется как

$$M = \frac{aU_{\sim}}{\omega^2 r_0^2} \frac{e}{m'}. \quad (15-13)$$

При выполнении условия (15-12) разрешающая способность прибора равна ∞ , однако чувствительность при этом близка к нулю. Поэтому работают при несколько меньших значениях отношения $U_{=}/U_{\sim}$.

Теоретическая разрешающая способность прибора зависит только от выбранного отношения постоянного и переменного напряжений.

Питание анализатора напряжением вида $U = U_0 + U_1 \cos \omega t$ должно быть симметричным относительно земли.

Интересно, что разрешение прибора не зависит до некоторого предела от энергии инжектируемых в анализатор ионов. Ограничение со стороны высоких энергий определяется условием, чтобы отфильтровываемые ионы успевали на всей длине анализатора набрать амплитуду величиной r_0 . Для этого они должны на всем пути анализатора совершить под влиянием переменного поля не менее приблизительно $3,5 \sqrt{M/\Delta M}$ колебаний. Ионизация газа в источнике ионов может производиться как электронным лучом, так и за счет газового разряда.

Чувствительность прибора определяется эффективностью ионизации газа в источнике, выходом ионов из источника в анализатор и его фильтрующими свойствами.

Все эти факторы взаимно связаны. Разрешающая способность возрастает с массой иона таким образом, что разрешение ΔM по всему диапазону масс остается постоянным. Установка вторичного электронного умножителя за отверстием приемника ионов увеличивает чувствительность и скорость индикации ионного тока.

Отечественный квадрупольный масс-спектрометр КМ-2 предназначен для анализа состава газов и паров летучих веществ в диапазоне давлений 10^{-2} — 10^{-10} Па. В комплект прибора входят два датчика на диапазоны анализируемых масс 2—300 и 4—600 с разрешением ΔM , равным 1 и 5 соответственно. Время регистрации полного спектра масс от 1,5 до 2000 с. Индикация спектра масс производится на ленте самопишущего потенциометра и экране катодного осциллографа.

Монополярный масс-спектрометр. Монополярный масс-спектрометр представляет собой одну четвертую часть квадрупольного масс-спектрометра. Устройство ионного источника и приемника ионов монополярного масс-спектрометра аналогично устройству этих узлов квадрупольного масс-спектрометра. Анализатор датчика состоит из круглого стержня и пластины уголкового профиля. Уголок находится под потенциалом земли, а на стержень подается напряжение вида

$$U = U_0 + U_1 \cos \omega t.$$

В зазоре между электродами распределение потенциалов имеет тот же вид, что и для квадрупольного масс-спектрометра. Принцип работы анализатора такой же, как и в квадрупольном масс-спектрометре. Однако при прочих равных условиях монополярный масс-спектрометр имеет более высокую по сравнению с квадрупольным масс-спектрометром разрешающую способность в широком диапазоне прикладываемых к анализатору напряжений. Как и квадрупольный, монополярный масс-спектрометр нечувствителен к энергии инжектируемых ионов в довольно широком диапазоне, что позволяет также использовать электроразрядный источник ионов.

Монополярный масс-спектрометр АПДМ-1 обеспечивает индикацию состава газов в диапазоне масс от 1 до 400 и давлений от $6 \cdot 10^{-2}$ до 10^{-11} Па. Разрешающая способность на уровне 10% амплитуды пика равна массовому числу M или разрешение $\Delta M=1$. Чувствительность по азоту с применением вторичного электронного умножителя не менее 10^{-2} А/Па, без него — не менее 10^{-7} А/Па. Развертка спектра масс осуществляется вручную и автоматически. Время автоматической развертки масс всего спектра или части его от 0,1 до 1500 с. Индикация спектра масс производится по стрелочному прибору, на экране электроно-лучевой трубки или может быть записана на ленте самопишущего потенциометра.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

16-1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ

Один из важнейших параметров вакуумной системы — давление, определяется балансом потоков поступающего и откачиваемого газов.

Поэтому при проведении различных процессов в вакууме важно знать поток откачиваемых газов, тем более, что поток является в известной степени характеристикой качества обезгаживания или состояния поверхности вакуумной системы.

Давление p в полости откачиваемого через штенгель электровакуумного прибора определяется следующим образом:

$$p_1 = p_2 + \Delta p = p_2 + \frac{Q'}{U}, \quad (16-1)$$

где p_2 — давление в вакуумной системе; Δp — перепад давления на откачном штенгеле изделия; Q' — поток газа, проходящий через откачной штенгель; U — проводимость штенгеля.

Контроль потока газа из ЭВП позволяет оптимизировать процесс его обработки.

Данные о потоке газа необходимы при определении характеристик вакуумных насосов (см. § 12-7), измерении проводимости вакуумных элементов, при исследовании газовыделения конструкционных материалов и при решении других задач.

Поток газа характеризует количество переносимого вещества $\Delta(pV)$ за промежуток времени Δt :

$$Q' = \frac{\Delta(pV)}{\Delta t}. \quad (16-2)$$

Соотношения между разными единицами измерения потока приведены в табл. 16-1.

Таблица 16-1

Соотношения между различными единицами измерения потока разреженного газа

Единицы измерения	м ³ ·Па/с=Вт	л·мм рт. ст/с	л·ммк рт. ст/с	см ³ ·атм/с
м ³ ·Па/с = Вт	1	7,5	7,5·10 ³	10
л·мм рт. ст/с	0,133	1	10 ³	1,32
л·ммк рт. ст/с	1,33·10 ⁻⁴	10 ⁻³	1	1,32·10 ⁻³
см ³ ·атм/с	0,10	0,75	750	1
м ³ ·атм/ч	28	2,1·10 ²	2,1·10 ⁵	2,8·10 ²

Ниже будут рассмотрены методы измерения потока газа при давлениях меньше 10 Па. Измерение потоков газа при больших давлениях здесь не рассматривается, хотя некоторые приемы измерения потока разреженного газа в основе своей базируются на аналогичных измерениях потока при высоких давлениях [34].

Погрешность измерения потока разреженного газа обычно составляет от —50 до +100% и во многом обу-

Таблица 16-2

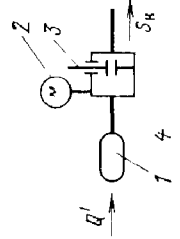
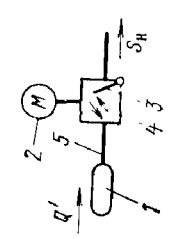
Методы измерения потока разреженного газа

Номер схемы	Наименование метода измерения	Схема измерения	Основная зависимость	Минимальный измеряемый поток, м ³ ·Па/с	Примечания
1	Метод накопления		$Q' = \frac{\Delta pV}{\Delta t}$	10 ⁻¹²	1. Позволяет периодически измерять поток 2. Применяется в лабораторных исследованиях и в. тесискании 3. Точность измерения зависит от сорбционно-десорбционных явлений в манометрическом преобразователе и в системе накопления газа
2	Метод накопления с изолируемым манометрическим преобразователем		$Q' = \frac{[p_3(V_1 + V_2) - (p_0V_1 + p_2V_2)]}{\Delta t}$; при $V_1 \ll V_2$ и $p_2 = p_0$ $Q' = \frac{(p_3 - p_0) V_2}{\Delta t}$	10 ⁻⁶	1. Позволяет периодически измерять поток 2. Лабораторные и исследовательские установки 3. Резко снижено влияние манометрического преобразователя на результаты измерений

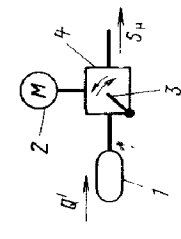
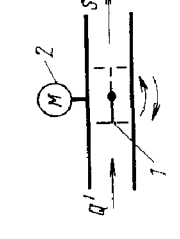
Номер схем	Наименование метода измерения	Схема измерения	Основная зависимость	Минималь- ный изме- ряемый поток, мг.Па/с	Примечания
3	Метод накопления с анализом динамики накопления		Способ интегрирования $Q' = \frac{V_2}{\Delta t} \frac{\Delta p_{\max} F_1}{F_0}$ Способ дифференциро- вания $Q' = V_2 \frac{dp}{dt}$	10^{-7}	1. Позволяет периодически измерять поток 2. Требуется применения интегрирующих или дифференцирующих устройств для обработки данных 3. Применяется в промышленных установках, предназначенных для АСУТП с выводом на ЭВМ 4. Резко снижено влияние манометрического преобразователя на результаты измерений
4	Метод калиброванно- го потока		$Q' = \frac{Q'_k}{\frac{p_2}{p_1} - 1}$	10^{-4}	1. Позволяет периодически измерять поток 2. Требуется периодически впуска ка либрованного потока газа 3. Применяется в полупромышленных установках

Номер схем	Наименование метода измерения	Схема измерения	Основная зависимость	Минималь- ный изме- ряемый поток, мг.Па/с	Примечания
5	Метод калиброван- ного сопловиде- ния и двух манометрических преоб- разователей		$Q' = C (F_1 - F_2)$	10^{-6}	1. Непрерывные измерения потока 2. Широко применяется в лабораторной практике и промышленности для измерения быстродействия насосов, калибровки измерительной аппаратуры и т. п. 3. Точность измерений зависит от сорбционно-десорбционных явлений в системе и манометрических преобразователях и от флюктуаций отсчетов вакуумметров
6	Метод двух калиброванных сопловидений и одного манометрического преобразователя		$Q' = U_s (p_1 - p_2)$	10^{-6} — 10^{-7}	1. Позволяет периодически измерять поток 2. Применяется в некоторых постах откачки ЭВП 3. Точность измерений зависит от сорбционно-десорбционных явлений в системе и манометрическом преобразователе

Продолжение табл. 16-2

Номер схем	Наименование метода измерения	Схема измерения	Основная зависимость	Минималь- ный изме- ряемый поток, мг. Па/с	Примечания
7	Метод, использую- щий насос с вы- сокой скоростью действия		$Q' = U p$	—	4. Исключено влияние флуктуаций отсчетов двух вакуумметров 1. Непрерывные измерения потока 2. Применяется в промышленных постах откачки ЭВП 3. Необходим контроль за скоростью действия вакуумного насоса
8	Метод модуляции потока газа на выходе измерительной камеры		Полное перекрытие $Q' = K_{pV} U p \sim$ Частичное перекрытие $Q' = U p \sim$	10^{-5} — 10^{-6}	1. Непрерывные измерения потока 2. Применяется в печах вакуумного отжига ЭВП и в исследовательских установках 3. Высокая чувствительность

Продолжение табл. 16-2

Номер схем	Наименование метода измерения	Схема измерения	Основная зависимость	Минималь- ный изме- ряемый поток, мг. Па/с	Примечания
9	Метод модуляции потока газа на входе в измерительную камеру		$Q' = c p \sim V$	10^{-5} — 10^{-6}	1. Непрерывные измерения потока 2. Применяется в промышленных технологических установках 3. Независимость к сорбционно-десорбционным явлениям в манометрическом преобразователе и измерительной камере 4. Малая величина выходного сигнала
10	Метод перемешивающегося сопротивления		$Q' = U p \sim$	10^{-4} — 10^{-5}	1. Непрерывные измерения потока 2. Применяется в лабораторных и промышленных установках 3. Точность измерений зависит от сорбционно-десорбционных явлений, погрешности измерений проводимости зазоров и давления

Номер схемы	Наименование метода измерения	Схема измерения	Основная зависимость	Минимальный измеряемый поток, м ³ Па/с	Примечания
11	Метод порционного перепуска газа		$Q' = V (p_1 - p_2) n$	10^{-5}	<ol style="list-style-type: none"> 1. Непрерывные измерения потока 2. Применяется в вакуумной метрологии и в исследовательской практике 3. Широкий диапазон работы — независимость от режима течения газа 4. В любой момент времени вакуумная система перекрывается от насоса измерителем потока 5. Малая проводимость измерителя потока в выключенном положении требует применения обводной магистральной

словлена сорбционно-десорбционными процессами и погрешностью определения расчетных величин давления.

К методам и аппаратуре для измерения потока разреженного газа предъявляются следующие требования

- 1) воспроизводимость результатов измерений в широком диапазоне давлений;
- 2) максимальная проводимость устройства для измерения потока;
- 3) минимальное усложнение вакуумной системы;
- 4) возможность автоматизации процесса измерения потока и вывода результатов измерений во внешнюю цепь (для записи, использования в цепях управления и других целей).

Известные методы измерения потока разреженных газов можно разделить на две группы:

1. *Периодические измерения*, при которых в течение определенного промежутка времени производится усредненный за этот промежуток отсчет величины потока.
2. *Непрерывные измерения*.

В табл. 16-2 приводятся наиболее распространенные методы измерения потока разреженного газа и их краткие технические характеристики

16-2. МЕТОД НАКОПЛЕНИЯ

При измерении потока методом накопления (см схему 1 табл. 16-2) часть вакуумной системы с источником потока 1 и манометрическим преобразователем 2 отъединяется затвором 3 от насоса на фиксированное время Δt . В отъединенной части вакуумной системы с известным объемом V вследствие газовыделения Q' давление увеличивается на Δp , а количество газа возрастает на ΔpV . Измеряемый поток разреженного газа равен

$$Q' = \frac{\Delta pV}{\Delta t}, \quad (16-3)$$

где $\Delta p = p_2 - p_1$ — прирост давления в отъединенной части вакуумной системы; p_1 — давление в системе, измеренное до перекрытия затвора; p_2 — давление в системе после закрытия затвора; V — суммарный объем отъединенной части вакуумной системы, Δt — время, в течение которого часть вакуумной системы была отъединена от насоса.

Это метод измерения потока наиболее прост и практически доступен для большинства вакуумных устано-

вок. Для него характерны высокая чувствительность и возможность применения в широком диапазоне давлений.

Метод накопления нельзя использовать при измерении быстро изменяющихся потоков и при высоких давлениях в объеме накопления (порядка 10^3 — 10^4 Па). В последнем случае сам поток, если он определяется натеканием газа из атмосферы, будет уменьшаться пропорционально разности между давлением в объеме накопления и атмосферным давлением. Нередко ограничения в возрастании давления при перекрытом затворе диктуются спецификой обрабатываемых электровакуумных изделий, в которых не допускается увеличение давления выше определенного значения.

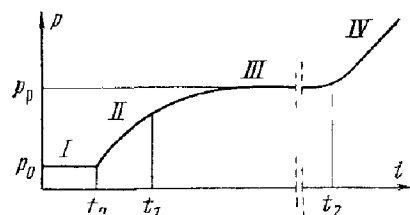


Рис. 16-1. Динамика изменения давления в изолированной от насоса вакуумной системе.

I — начальное давление p_0 ; *II* — система изолирована от насоса в момент t_0 и давление начинает расти, *III* — давление достигло равновесного значения p_p , когда $Q' = Sp_p$, где S — скорость сорбции газов в отъединенной вакуумной системе; *IV* — сорбционная емкость системы как откачивающего средства достигла насыщения, и давление в системе вновь увеличивается.

Следует указать на некоторые особенности в измерении потока методом накопления, которые необходимо учитывать для исключения значительных ошибок.

Сорбционно-десорбционные явления. На результаты измерения потока методом накопления резко влияют сорбционно-десорбционные явления в отъединяемой части вакуумной системы с источником потока. Динамика изменения давления в отъединенной части описывается уравнением (3-36).

Если поток газа Q' обусловлен натеканием из атмосферы через негерметичность, то тогда он не зависит от давления в отъединенной части (имеется в виду рассмотрение процессов в вакууме при давлениях ниже 10^3 Па). Если же поток газа обусловлен газовыделением, то, начиная с некоторых давлений, поток сам зависит от давления. При этом с ростом давления происходит резкое уменьшение величины потока.

Схематически изменение давления в отъединенной части может быть проиллюстрировано графиком рис. 16-1.

Измерения потока достоверны в течение времени, пока изменение давления близко к линейному, т. е. в интервале времени от t_0 до t_1 .

Измерение потока в разветвленной вакуумной системе. Как правило, отъединяется от насоса не одна вакуумная камера, а несколько объемов, соединенных между собой трубопроводами. При отъединении такой системы необходимо быть уверенным в том, что давление в системе распределилось равномерно, в пределах допустимой ошибки измерения. Иными словами, время перекрытия Δt должно быть не меньше некоторой величины.

Таблица 16-3

Выражения для оценки минимального времени прекращения перетекания газа $\Delta t_{\text{мин}}$ при определении потока по методу накопления в системе, состоящей из двух соединенных между собой камер 1 и 2

Перетекание происходит из камеры	Давление измеряется в камере	
	1	2
1	$\frac{\alpha_2 \tau_2}{\delta}$	$\frac{\alpha_1 \tau_2}{\delta}$
2	$\frac{\alpha_2 \tau_1}{\delta}$	$\frac{\alpha_1 \tau_1}{\delta}$

Практически в любой отъединенной вакуумной системе всегда можно выделить две камеры, соединенные трубопроводом малой проводимости. Наиболее характерным примером может быть система, состоящая из электровакуумного прибора (камера 1), соединенного откачным штенгелем малой проводимости с камерой 2, к которой подсоединен манометрический преобразователь. В одной из камер давление в момент закрытия крана меньше, чем в другой.

Поток газа Q' определяется из выражения

$$Q' = \frac{\Delta p (V_1 + V_2)}{\Delta t}, \quad (16-4)$$

где V_1 и V_2 — объемы камер 1 и 2. Объемом откачного штенгеля можно пренебречь.

Динамика процессов в системе, состоящей из двух камер, соединенных между собой, определяется дифференциальными уравнениями (8-33) и (8-34) при отсутствии откачки, т. е. при $U_{2-n}=0$.

Определим минимальное время прекращения перетекания газа из одной камеры в другую, исходя из дополнительной ошибки измерения δ (не более 0,25 или 25%) в связи с различием давлений в камерах. Рассчитанные зависимости приведены в табл. 16-3. В таблице приняты следующие обозначения:

$$\alpha_1 = \frac{V_1}{V_1 + V_2}; \quad (16-5)$$

$$\alpha_2 = \frac{V_2}{V_1 + V_2}. \quad (16-6)$$

Постоянные времени τ :

$$\tau_1 = \frac{V_1}{U}; \quad (16-7)$$

$$\tau_2 = \frac{V_2}{U}, \quad (16-8)$$

где U — проводимость штенгеля.

16-3. МЕТОД НАКОПЛЕНИЯ С ИЗОЛИРУЕМЫМ МАНОМЕТРИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Одним из основных источников ошибок, возникающих при измерении потока по методу накопления, является манометрический преобразователь, особенно содержащий накаленный катод. Манометрический преобразователь может быть как источником дополнительного газовойделения, так и производить нежелательную откачку накапливаемого газа.

Применение схемы с изолируемым манометрическим преобразователем позволяет резко снизить воздействие манометрического преобразователя на результаты измерения потока по методу накопления [17]. На схеме 2 табл. 16-2 показана измерительная камера 5 объемом V_2 с манометрическим преобразователем 3 и двумя кранами 2 и 4, с помощью которых можно изолировать манометрический преобразователь 3 как от камеры с источником потока 1, так и от вакуумного насоса.

При измерении потока газа вначале регистрируют установившееся в вакуумной системе давление p при открытых кранах 2 и 4. Затем краны 2 и 4 закрывают. По истечении времени Δt с момента закрытия кранов давление в камере 1 возрастает до величины p_1 . За это же время давление в измерительной камере 5 станет равным значению p_2 . При открытии крана 2 давления в камерах 1 и 5 выравниваются до значения p_3 в соответствии с уравнением

$$(p_1 - p_0)V_1 + (p_2 - p_0)V_2 = (p_3 - p_0)(V_1 + V_2), \quad (16-9)$$

где V_1 — объем камеры 1; V_2 — объем камеры 5; p_0 — установившееся давление при открытых кранах 2 и 4; p_1 — давление в камере 1 через промежуток времени Δt после закрытия кранов 2 и 4; p_2 — давление в камере 5 через промежуток времени Δt после закрытия кранов 2 и 4; p_3 — давление, установившееся в системе после открытия крана 2.

Тогда поток газа Q' из камеры 1 будет равен:

$$Q' = \frac{p_3(V_1 + V_2) - (p_0V_1 + p_2V_2)}{\Delta t}. \quad (16-10)$$

В случае, если объем камеры 1 — источника газовойделения существенно меньше объема измерительной камеры 5 ($V_1 \ll V_2$) и давление в измерительной камере с манометрическим преобразователем практически не изменяется во время перекрытия кранов ($p_2 = p_0$), формула (16-10) упрощается:

$$Q' = \frac{(p_3 - p_0)V_2}{\Delta t}. \quad (16-11)$$

16-4. МЕТОД НАКОПЛЕНИЯ С АНАЛИЗОМ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Влияние сорбционно-десорбционных явлений в манометрическом преобразователе на результаты измерения потока может быть сведено к минимуму, если измерение давления производить по схеме 3 табл. 16-2. Во время откачки камеры 1 — источника потока (рис. 16-2) в вакуумной системе установилось давление p_0 , измеряемое манометрическим преобразователем 3. На рис. 16-3 показаны графики изменения давления во времени. При закрытии крана 2 на фиксированное время Δt давление

в системе со стороны насоса вследствие прекращения поступления газа из камеры 1 понизится до p_1 . В это же время в связи с прекращением откачки давление в камере с источником потока возрастает до p_3 .

При достаточно быстром открытии крана 2 давление в системе вначале возрастает до p_2 , а затем начнет уменьшаться до p_0 . Заметим, что для реализации этого

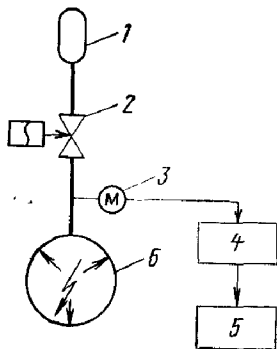


Рис. 16-2. Высоковакуумная система для измерения потока газа по схеме 3 табл. 16-2.

1 — вакуумный прибор (источник потока); 2 — кран с электромеханическим быстродействующим приводом; 3 — манометрический преобразователь; 4 — вакуумметр; 5 — интегратор; 6 — высоковакуумный насос.

метода необходимы насос с постоянной или мало меняющейся во время измерения быстротой действия и достаточно быстродействующий автоматизированный затвор.

По способу обработки сигнала, необходимого для расчета потока газа, различают способ *интегрирования* [63] и способ *дифференцирования* [64].

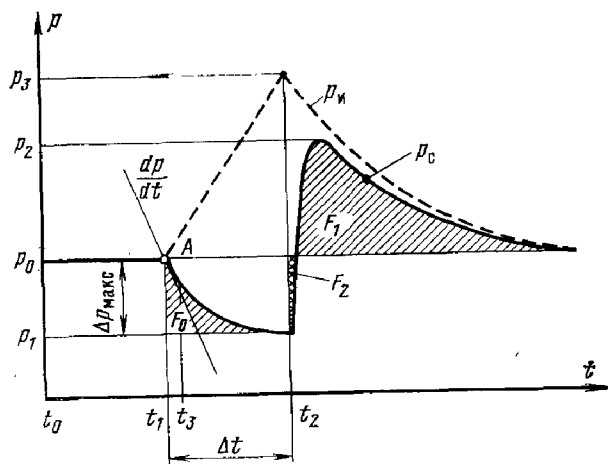


Рис. 16-3. Изменение давления в вакуумной системе в зависимости от времени.

Способ интегрирования. Площадь \bar{F}_1 , ограниченная кривой изменения давления в системе $p_c(t)$ после открытия крана и горизонтальной линией давления p_0 , пропорциональна количеству накопленного газа в отъединенной части вакуумной системы:

$$F_1 [p_c(t)] = p_3 \frac{V_1}{S_0}, \quad (16-12)$$

где p_3 — давление в системе со стороны источника потока к концу времени накопления Δt ; V_1 — объем отъединенной вакуумной системы с источником потока; S_0 — эффективная быстрота откачки системы в месте расположения преобразователя 3.

Если пренебречь площадью F_2 , составляющей обычно менее 1% площади F_1 , то

$$F_1 [p_c(t)] = \int_{t_2}^{\infty} p_c(t) dt. \quad (16-13)$$

После закрытия крана изменение давления $p_n(t)$ в источнике потока может быть записано в виде

$$p_n(t) = \frac{1}{V_1} Q' t, \quad (16-14)$$

где Q' — определяемый поток газа из источника потока.

Тогда за время накопления Δt давление в системе со стороны источника потока достигнет значения

$$p_3 = \frac{1}{V_1} Q' \Delta t. \quad (16-15)$$

Подставляя уравнение (16-15) в (16-12), получаем:

$$Q' = \frac{F_1 [p_c(t)] S_0}{\Delta t}. \quad (16-16)$$

Уравнение нестационарного процесса изменения давления в системе после закрытия крана имеет вид:

$$V_2 \frac{d(\Delta p)}{dt} = -\Delta p S_0, \quad (16-17)$$

где $\Delta p = p_c(t) - p_1$; V_2 — объем вакуумной системы между насосом 6 и краном 2; S_0 — эффективная быстрота откачки системы в месте расположения преобразователя 3.

Интегрирование выражения (16-17) дает:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{макс}} e^{-\frac{S_0}{V_2} t}, \quad (16-18)$$

где $\Delta p_{\text{макс}} = p_0 - p_1$.

Площадь $F_0(\Delta p)$, ограниченная кривой изменения давления $p_c(t)$ в вакуумной системе после закрытия крана и горизонтальной линией, соответствующей давлению p_1 , пропорциональна количеству газа, откачиваемого насосом после закрытия крана. Эта площадь может быть найдена по формуле

$$F_0(\Delta p) = \int_0^{\Delta t} \Delta p_{\text{макс}} e^{-\frac{S_0}{V_2} t} dt, \quad (16-19)$$

откуда при достаточно большом времени Δt получим:

$$F_0(\Delta p) = \Delta p_{\text{макс}} \frac{V_2}{S_0}. \quad (16-20)$$

Подставляя значения S_0 из выражения (16-20) в уравнение (16-16), окончательно получим:

$$Q' = \frac{V_2}{\Delta t} \frac{\Delta p_{\text{макс}} F_1 [p_c(t)]}{F_0(\Delta p)}. \quad (16-21)$$

Необходимость точного учета количества газа, откачиваемого из полости V_2 между краном и насосом, требует, чтобы время перекрытия откачки $\Delta t_{\text{мин}}$ краном было не меньше определенной величины. При условии, что газ из полости V_2 откачан на 95%, это соответствует утроенной постоянной времени, т. е. время перекрытия откачки краном должно быть не менее

$$\Delta t_{\text{мин}} \geq 3 \frac{V_2}{S_0}.$$

Таким образом, для измерения потока газа из источника потока I вначале измеряют установившееся в системе давление p_0 , затем закрывают кран 2 на фиксированное время Δt и, измерив установившееся при этом давление p_1 , определяют разность давлений:

$$\Delta p_{\text{макс}} = p_0 - p_1.$$

Одновременно с этим, интегрируя выходной сигнал вакуумметра 4 с помощью интегратора 5 , определяют площадь F_0 . Затем открывают кран 2 и, интегрируя вы-

ходной сигнал вакуумметра 4 с помощью интегратора 5 , определяют площадь F_1 . Зная величины V_2 , Δt , проводимость крана 2 и быстроту действия насоса S_n , с помощью уравнения (16-21) можно определить поток газа, выделяющегося из источника потока I .

Основным преимуществом рассматриваемого метода является возможность измерений весьма малых потоков газа за счет значительного снижения влияния на точность измерений сорбционно-десорбционных процессов, происходящих в манометрическом преобразователе.

Способ дифференцирования. Измерение потока газа может быть несколько упрощено путем дифференцирования изменения давления в первый момент после закрытия крана (вблизи точки A) вместо интегрирования.

Нестационарный процесс откачки части системы объемом V_2 после закрытия крана [уравнение (16-17)] описывается функцией изменения давления во времени

$$p = p_0 e^{-\frac{S_0}{V_2} t}. \quad (16-22)$$

Это экспоненциальное изменение давления (16-22) можно для $t \ll V_2/S_0$ заменить линейной зависимостью

$$p = p_0 \left(1 - \frac{S_0}{V_2} t\right). \quad (16-23)$$

Ошибка аппроксимации не превысит 10% (для измерения потока такая максимальная дополнительная ошибка вполне допустима), если время измерений

$$t_3 - t_1 \leq 0,375 \tau_2, \quad (16-24)$$

где τ_2 — постоянная времени откачки объема V_2 :

$$\tau_2 = \frac{V_2}{S_0}, \quad (16-25)$$

где S_0 — эффективная быстрота откачки системы в месте расположения преобразователя 3 ; V_2 — объем вакуумной системы между насосом 6 и краном 2 .

Из уравнения (16-23) найдем, что

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p_0 S_0}{V_2}. \quad (16-26)$$

Поскольку $p_0 S_0 = Q'$, то

$$Q' = -V_2 \frac{dp}{dt}. \quad (16-27)$$

Более жестким условием правомерности использования этого метода, нежели условие (16-24), является требование к быстродействию крана. Время закрытия крана должно быть по крайней мере на порядок меньше допустимого времени измерения потока, определяемого неравенством (16-24):

$$t_{\text{закр. крана}} \leq 0,04 \frac{V_2}{S_0} \quad (16-28)$$

В реальных условиях изменение давления с момента закрытия крана описывается плавной кривой уменьшения давления. Максимальная величина производной dp/dt характеризует поток газа.

Этот способ по сравнению со способом интегрирования более прост по технике обработки результатов измерений, имеет большую точность в связи с необходимостью измерения меньшего количества переменных величин и резко сокращает время, в течение которого источник потока (обрабатываемый электровакуумный прибор) отъединен от насоса.

Измерение потока путем обработки сигнала как интегрированием, так и дифференцированием может быть легко автоматизировано с помощью ЭВМ, а результаты измерения при этом использованы в автоматических системах управления технологическими процессами (АСУТП).

16-5. МЕТОД КАЛИБРОВАННОГО ПОТОКА

При реализации этого метода в рабочий объем вакуумной системы вводят поток газа Q'_k , значение которого известно, а парциальный состав соответствует составу газа, выделяющегося из источника потока I (схема 4 табл. 16-2). Для определения потока из источника I проводят два измерения давления: с подведенным потоком (p_2) и без него (p_1). Если эффективная быстрота откачки S_0 в районе установки манометрического преобразователя 2 остается постоянной, то на основе уравнений

$$S_0 = \frac{Q'}{p_1};$$

$$S_0 = \frac{Q' + Q'_k}{p_2}$$

получим

$$Q' = \frac{Q'_k}{p_2/p_1 - 1}, \quad (16-29)$$

где Q' — поток газа из источника потока I ; Q'_k — известный вводимый поток газа; p_1 — давление в системе до введения в нее потока; p_2 — давление в системе после введения в нее потока.

Постоянство эффективной быстроты откачки проверяется путем повторного измерения при другом значении вводимого потока Q'_k . Если окажется при этом, что величина измеряемого потока Q' не изменилась, то это означает, что эффективная быстрота откачки оставалась постоянной и отсчеты потока достоверны.

В том случае, когда эффективная быстрота откачки в месте присоединения манометрического преобразователя определяется проводимостью трубопроводов (быстрота действия насоса существенно выше проводимости трубопроводов, что характерно для случая откачки электронных приборов), в качестве вводимого потока может быть использован поток газа другого, но известного парциального состава. Тогда измеряемый поток будет равен:

$$Q' = \frac{Q'_r}{p_2/p_1 \left(1 + \sqrt{\frac{M_{\text{пр}}}{M_k}} / \alpha_r \right) - 1}, \quad (16-30)$$

где M_k и $M_{\text{пр}}$ — молекулярные массы вводимого калибровочного газа и газа из источника; α_r — относительная чувствительность манометрического преобразователя для вводимого газа по отношению к газу из источника потока:

$$\alpha_r = \frac{\alpha_k}{\alpha_{\text{пр}}}, \quad (16-31)$$

где α_k и $\alpha_{\text{пр}}$ — относительные чувствительности манометрического преобразователя для вводимого газа и газа из источника потока по отношению к азоту.

В случае, если обследуемый поток является смесью нескольких газов, средняя «эффективная» молекулярная масса смеси $M_{\text{см}}$ может быть определена по выражению

$$M_{\text{см}} = \frac{p_1 M_1 + p_2 M_2 + \dots + p_n M_n}{p_{\text{общ}}}, \quad (16-32)$$

где p_1, p_2, p_n — парциальные давления компонентов в газовой смеси; M_1, M_2, M_n — их молекулярные массы; $p_{\text{общ}}$ — сумма парциальных давлений.

В качестве источника вводимого потока однородного газа удобно использовать стандартную гелиевую течь.

16-6. МЕТОД КАЛИБРОВАННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ДВУХ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Для измерения потока газа в трубопроводе устанавливают калиброванное сопротивление (капилляр, диафрагму) 3 известной проводимости (схема 5 табл. 16-2). При движении газа на калиброванном сопротивлении возникает разность давлений, которая измеряется с помощью манометрических преобразователей 1 и 2, устанавливаемых по обе стороны сопротивления. Поток газа рассчитывается по уравнению

$$Q' = U_{\text{отв}}(p_1 - p_2), \quad (16-33)$$

где $U_{\text{отв}}$ — проводимость сопротивления 3; p_1 — давление газа, измеренное перед сопротивлением преобразователем 1; p_2 — давление газа, измеренное после сопротивления преобразователем 2.

В качестве калиброванного сопротивления наиболее часто используют тонкие перегородки, в которых делают несколько отверстий. Толщина стенки перегородки должна быть не менее чем в 20 раз меньше диаметра отверстия в ней, которое в свою очередь должно быть во столько же раз меньше размеров трубопровода (диаметра или расстояния до ближайшей стенки).

В качестве калиброванного сопротивления нередко также используют имеющийся коммутирующий элемент, например вакуумный кран, проводимость которого оценивается экспериментально. В этом случае при калибровке системы вместо обрабатываемого прибора (источника потока) к системе подсоединяют источник регулируемого потока со своим измерителем и определяют взаимосвязь между разностью давлений $p_1 - p_2$ и потоком газа известной величины для разных фиксированных положений крана.

Коррекцию изменения проводимости крана в связи с тем, что газовый состав потока из обрабатываемого прибора отличается от потока из источника, при граду-

ировке проводимости крана можно провести на основании уравнения (16-32).

Метод измерения потока с помощью калиброванного сопротивления нашел широкое распространение в промышленности и лабораторной практике. Он применяется для измерения потока газа из приборов при их обработке на откачном посту, быстроты действия насосов, проводимости трубопроводов и других вакуумных элементов. Недостатком метода является то, что для измерения потока газа с достаточной точностью необходимо использовать диафрагму малой проводимости, чтобы создать разность давлений, отличающихся в 3—10 раз. Столь значительная разность давлений приводит к существенному повышению давления в полости обрабатываемого прибора из-за резкого ограничения быстроты его откачки.

Измерение этим методом потоков менее 10^{-6} м³·Па/с затруднено из-за сорбционно-десорбционных процессов в манометрических преобразователях и вакуумной системе.

16-7. МЕТОД ДВУХ КАЛИБРОВАННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ОДНОГО МАНОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

С целью уменьшения ошибок измерения потока, связанных с использованием двух манометрических преобразователей, применяют метод двух калиброванных сопротивлений и одного манометрического преобразователя (схема 6 табл. 16-2). В этом случае для измерения потока газа трубопровод с калиброванным сопротивлением 1 и манометрическим преобразователем 4 шунтируют обводным трубопроводом с затвором 3 и вторым калиброванным сопротивлением 2. При измерении потока этим методом необходимо, чтобы быстрота действия насоса во время измерений оставалась постоянной.

Ошибка в измерении потока будет минимальна в том случае, если проводимости сопротивлений 1 и 2 близки по значению. Поток газа, протекающий через систему при закрытом и открытом затворе 3, равен:

$$Q' = U_1(p_1 - p'_1);$$

$$Q' = U(p_2 - p'_2),$$

где U_1 — проводимость сопротивления 1; U — результирующая проводимость сопротивления 1, обводного трубопровода с сопротивлением 2 и затвором 3.

Обводной трубопровод и затвор рекомендуется делать с проводимостью, на два порядка более высокой по сравнению с проводимостью сопротивлений 1 или 2. Тогда

$$U = U_1 + U_2, \quad (16-34)$$

где U_2 — проводимость сопротивления 2; p_1 и p_2 — отсчеты давлений вакуумметром перед сопротивлениями со стороны источника потока при закрытом и открытом затворе 3 соответственно; p'_1 и p'_2 — давления с другой стороны сопротивлений.

Давления p'_1 и p'_2 равны, поскольку потоки и быстрота действия насоса в обоих измерениях остаются постоянными. После преобразований, учтя, что $p'_1 = p'_2$, получим:

$$Q' = U_0(p_1 - p_2), \quad (16-35)$$

где U_0 — расчетная проводимость для измерения потока:

$$U_0 = \frac{U_1}{U_2} (U_1 + U_2). \quad (16-36)$$

При $U_1 = U_2$

$$U_0 = 2U_1. \quad (16-37)$$

Измерение потока этим методом можно осуществить и без обводного трубопровода. Для этого в трубопроводе с манометрическим преобразователем устанавливается заслонка, имеющая два или даже три фиксированных положения, характеризующихся проводимостями U_1 , U_2 и U_3 .

При определении потока газа дважды измеряют давление при разных положениях заслонки и по формуле (16-35) вычисляют поток газа. Естественно, отсчеты давления делаются после того, как давления в системе после переключения заслонки стабилизированы. Третье положение заслонки (соответствующее проводимости U_3) позволяет проверить достоверность измерения потока, т. е. стабильность быстроты действия насоса во время всех измерений.

16-8. МЕТОД, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ НАСОС С ВЫСОКОЙ БЫСТРОТОЙ ДЕЙСТВИЯ

Метод калиброванного сопротивления и двух манометрических преобразователей по схеме 5 табл. 16-2 можно видоизменить при откачке электронных приборов

насосом с высокой быстротой действия. Обычно электронные приборы снабжены откачным штенгелем 4 с проводимостью менее 1 л/с, а применяемые для их откачки насосы имеют, как правило, быстроту действия не менее 100 л/с (см. схему 7 табл. 16-2). При использовании этого метода между прибором 1 и насосом устанавливается заслонка 3. Перекрытие трубопровода заслонкой производится настолько, что эффективная быстрота откачки S_0 в месте присоединения манометрического преобразователя 2 становится значительно меньше быстроты действия насоса S_n и практически определяется проводимостью U заслонки 3, т. е.

$$S_0 \approx U.$$

Зная предварительно рассчитанное или измеренное значение проводимости U и измеряя установившееся в системе давление p , поток газа можно определить по формуле

$$Q' = pS_0 = pU. \quad (16-38)$$

Общий недостаток методов калиброванного сопротивления заключается в том, что при их применении постоянство сопротивления с изменением давления сохраняется только до тех пор, пока течение газа происходит в молекулярном режиме. В молекулярно-вязкостном и вязкостном режимах течения газа проводимость элементов зависит от среднего давления (см. гл. 6), и оценка потока становится более сложной.

16-9. МЕТОД МОДУЛЯЦИИ ПОТОКА ГАЗА НА ВЫХОДЕ ИЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Как уже отмечалось, одним из недостатков непрерывного измерения потока методом перепада давлений на калиброванном сопротивлении с использованием двух манометрических преобразователей являются флюктуации начальных отсчетов вакуумметров. Именно эти флюктуации заставляют применять элементы с малой проводимостью, обеспечивающие перепады давления, значительно большие, чем возможные флюктуации показаний вакуумметров.

Методы модуляции потока газа и измерение переменной составляющей давления позволяют для измерения потока использовать один манометрический пре-

образователь. Кроме того, измерение переменной составляющей позволяет использовать модулирующие устройства с малым коэффициентом перекрытия откачного трубопровода, т. е. с высокой проводимостью.

Постоянная времени измерения давления при модуляции потока должна быть в 5—10 раз меньше времени перекрытия трубопровода заслонкой, т. е. составлять 1—20 мс. Такое быстрое действие измерения давления обеспечивается электронными ионизационными или электроразрядными вакуумметрами.

Для осуществления метода модуляции потока на выходе из измерительной камеры между источником потока 1 (схема 8 табл. 16-2) и насосом устанавливают измерительную камеру 4 с манометрическим преобразователем 2 и заслонкой 3, периодически перекрывающей выход газа из измерительной камеры.

В зависимости от характера перекрытия выхода газа заслонкой различают два способа работы прибора и оценки потока.

Полное перекрытие выхода газа из измерительной камеры. Для первого момента времени возрастание давления в измерительной камере следует закону, близкому к линейному (см. рис. 16-1). В оценке потока учитывается объем только измерительной камеры. Однако, поскольку накопление газа при закрытой заслонке 3 с течением времени происходит не только в измерительной камере 4, но и в камере с источником потока 1, проводимость трубопровода 5 при некоторой заданной частоте модуляции или время перекрытия заслонки (обратно пропорциональное частоте модуляции) при заданной конструкции системы должны быть не более определенной величины. Это условие исключает накопление значительного количества газа вне измерительной камеры.

Выходной сигнал манометрического преобразователя 2 состоит из переменной и постоянной составляющих, пропорциональных давлению. Амплитудное значение переменной составляющей давления при стабильном движении заслонки позволяет непосредственно отсчитывать поток газа. Постоянная составляющая указывает на некоторое среднее давление в полости измерительной камеры.

Поток газа равен:

$$Q' = K_n V_1 p_{\sim} \quad (16-39)$$

где V_1 — объем измерительной камеры 4 (объем трубопровода и камеры с источником потока не учитываются); p_{\sim} — разность давлений между максимальным и минимальным значениями — переменная составляющая; K_n — чувствительность измерения потока, зависящая от частоты и характера модуляции, а также конструкции вакуумной системы.

При дополнительной максимальной ошибке в 20% за счет накопления газа в приборе с источником потока и линейной аппроксимации экспоненциальной зависимости изменения давления в измерительной камере от времени длительность перекрытия выхода газа заслонкой Δt должна быть не более

$$\Delta t \leq 0,4 \frac{V_1 V_2}{U (V_1 + V_2)}, \quad (16-40)$$

где V_1 — объем измерительной камеры 4; V_2 — объем камеры с источником потока; U — проводимость трубопровода 5.

Чувствительность измерения потока K_n для конкретных конструкций и режима работы может быть рассчитана или определена опытным путем с помощью калибровки по заданному потоку.

Частичное перекрытие выхода газа из измерительной камеры. В этом случае заслонка частично перекрывает выход газа из измерительной камеры. Время перекрытия газа из измерительной камеры, так же как и время откачки газа из нее при открытой заслонке, выбирается настолько большим, чтобы давления после каждого из переключений заслонки стабилизировались.

При открытой заслонке давление в измерительной камере определяется эффективной быстротой откачки:

$$Q' = S_0 p_1,$$

где S_0 — эффективная быстрота откачки газа из измерительной камеры при открытой заслонке; p_1 — давление в измерительной камере при открытой заслонке.

При прикрытой заслонке поток газа будет создавать разность давлений на ней:

$$Q' = U (p_2 - p'_1),$$

где U — проводимость зазора, оставшегося незакрытым заслонкой; p_2 — отсчет давления вакуумметром при при-

крытой заслонке после стабилизации режима течения газа; p'_1 — давление с другой стороны заслонки.

Поскольку поток газа и эффективная быстрота откачки во время обоих измерений оставались постоянными, то $p_1 = p'_1$. Тогда поток газа определяется из выражения

$$Q' = U p_{\sim}, \quad (16-41)$$

где $p_{\sim} = p_2 - p_1$ — переменная составляющая давления.

Условие стабилизации режима течения газа после каждого из переключений заслонки — выравнивание давлений на 95% требует, чтобы длительность обоих периодов была не менее утроенного значения соответствующих постоянных времени. Длительность частичного перекрытия выхода газа из измерительной камеры

$$\Delta t_{\text{пер}} \geq \frac{3V_1}{U}, \quad (16-42)$$

где $\Delta t_{\text{пер}}$ — время перекрытия измерительной камеры; V_1 — объем измерительной камеры 4; U — проводимость зазора, оставшегося незакрытым заслонкой.

Минимальная длительность откачки газа из измерительной камеры выражается аналогичной формулой, но вместо проводимости зазора необходимо учитывать эффективную быстроту откачки газа из измерительной камеры. Поскольку $S_0 \gg U$, то определяющим является выражение (16-42).

Этот способ позволяет достаточно точно измерять поток, но требует работы заслонки на относительно низких частотах от 2 до 10 Гц.

16-10. МЕТОД МОДУЛЯЦИИ ПОТОКА ГАЗА НА ВХОДЕ В ИЗМЕРИТЕЛЬНУЮ КАМЕРУ

Для осуществления этого метода между источником потока 1 и насосом (см. схему 9 табл. 16-2) также устанавливают измерительную камеру 4 с манометрическим преобразователем 2 и заслонкой 3, которая в этом случае перекрывает вход газа в измерительную камеру [14]. Этот метод является развитием метода накопления с анализом динамики давления в измерительной камере и дифференцированием сигнала давления при перекрытии откачки (см. § 16-4). Процесс перекрытия заслонки можно сделать периодическим с разным со-

отношением положений «закрото — открыто», например 1:10. Тогда выделенный через емкостную дифференцирующую цепочку переменный электрический сигнал, связанный с фазой перекрытия трубопровода заслонкой, укажет поток разреженного газа:

$$Q' = c p_{\sim} V. \quad (16-43)$$

где c — коэффициент пропорциональности; $p_{\sim} = p_2 - p_1$ — переменная составляющая давления; V — объем измерительной камеры.

Достоинством этого способа является его нечувствительность к газовыделению и даже небольшим течам в измерительной камере 4, что особенно ценно при работе в производственных условиях. Недостатком метода является относительно низкая чувствительность, обусловленная меньшим, чем в предыдущем методе, сигналом переменного тока.

16-11. МЕТОД ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Метод измерения потока с помощью калиброванного сопротивления и двух манометрических преобразователей, рассмотренный в § 16-6, можно видоизменить: использовать один манометрический преобразователь, но калиброванное сопротивление сделать перемещающимся, устанавливаемым то с одной, то с другой стороны трубопровода, соединяющего манометрический преобразователь с вакуумной системой (см. схему 10 табл. 16-2) [45]. Тогда преобразователь 2 будет естественно измерять давление то с одной, то с другой стороны от калиброванного сопротивления. Калиброванное сопротивление можно выполнить в виде заслонки 1, вращающейся в трубопроводе относительно преобразователя 2. Разность между максимальным и минимальным давлениями, измеряемыми манометрическим преобразователем, пропорциональна потоку газа:

$$Q' = U \Delta p = U p_{\sim}, \quad (16-44)$$

где U — минимальная проводимость между заслонкой 1 и стенкой трубопровода; $\Delta p = p_1 - p_2$ — разность между максимальным давлением p_1 , когда заслонка 1 находится между преобразователем 2 и насосом, и минимальным давлением p_2 , когда заслонка находится между

источником потока и преобразователем (амплитудное значение переменной составляющей давления).

Условием независимости показаний от конструкции вакуумной системы и ее работы является необходимость установления после каждого из переключений заслонки стационарного или близкого к нему течения газа в зазоре. Постоянная времени заполнения объема после переключения заслонки обычно составляет не более 10 мс, а время эффективного перекрытия трубопровода заслонкой может быть выбрано достаточно большим, например, при частоте качания заслонки 5 Гц оно составляет 50—80 мс. Колебательный принцип движения заслонки, подвешенной на торсоне и качающейся по синусоидальному закону, более эффективно использует время по сравнению с вращательным. Заслонка как бы прыгает из одного крайнего положения в другое, причем 70% своего времени заслонка перекрывает трубопровод, а 30% времени затрачивает на переход из одного крайнего положения в другое.

Проводимость зазора, образуемого заслонкой и стенкой трубопровода, может быть рассчитана по методу Монте-Карло или измерена экспериментально. В последнем случае предпочтительнее провести калибровку измерителя потока в целом. Для этого по потоку Q' и переменной составляющей давления p_{\sim} определяют постоянную прибора, т. е. проводимость U , необходимую для последующих измерений.

16-12. МЕТОД ПОРЦИОННОГО ПЕРЕПУСКА — ОБЪЕМНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПОТОКА

Объемные измерители потока широко применяются для измерения расхода газов и жидкостей в технике высоких давлений. Этот метод, обладающий повышенной точностью измерения, нашел применение и в вакуумной технике. Существенными достоинствами метода являются его применимость в широком диапазоне давлений и независимость показаний от характера течения газа.

Однокамерная конструкция измерителя потока газа с контролем давления по одному манометрическому преобразователю (см. схему 11 табл. 16-2) состоит из корпуса 3, в котором вращается или качается тонкостенная измерительная камера 2 объемом V , выполнен-

ная в виде цилиндра со щелью по образующей. В центре измерительной камеры установлен манометрический преобразователь 1.

Внутренняя полость цилиндра периодически сообщается то с линией источника потока, то с линией откачки. Газ порциями, равными внутреннему объему камеры V , умноженному на разность давлений $p_1 - p_2$, перепускается из линии источника потока в линию откачки. Измеряемый поток газа Q' равен:

$$Q'_{\sim} = V(p_1^{\sim} - p_2) n_{\sim} = V p_{\sim} n, \quad (16-45)$$

где p_1 - максимальное давление в измерительной камере 2 при ее соединении с линией источника потока; p_2 - минимальное давление в измерительной камере при ее соединении с линией откачки; n - частота вращения (качания) измерительной камеры.

При постоянной частоте вращения измерительной камеры поток однозначно определяется переменной составляющей давления.

Во время измерения потока этим методом линия источника потока в любой момент времени изолирована измерителем потока от линии откачки. Проводимость системы особенно резко уменьшится при остановке движения измерительной камеры до значения, определяемого проводимостью зазоров между измерительной камерой и корпусом. В связи с этим измеритель потока, основанный на методе порционного перепуска, целесообразно шунтировать обводным трубопроводом с затвором.

При условии, что газ при движении камеры успеет заполнить измерительную камеру (или выйти из нее) и давления между измерительной камерой и соответствующими частями системы успевают выровняться, проводимость измерителя потока определяется по выражению

$$U = Vn. \quad (16-46)$$

Очевидно, что с увеличением частоты вращения измерительной камеры пропорционально увеличивается проводимость измерителя потока. Однако, когда время одного полупериода становится сопоставимым со временем заполнения измерительной камеры газом, проводимость измерителя потока достигает максимального

значения и в дальнейшем не изменяется с увеличением частоты вращения камеры. Исходя из условия, что в каждом из положений впуска и выпуска газа камера находится в течение $\frac{1}{4}$ полупериода вращения и наполняется газом на 87%, что соответствует двум постоянным времени, частота вращения камеры должна быть не более

$$n \leq \frac{U}{8V}, \text{ об/с}, \quad (16-47)$$

где n — частота вращения (качания) измерительной камеры; U — проводимость канала для входа газа в камеру.

С увеличением частоты вращения камеры падает чувствительность метода измерения потока из-за уменьшения отношения $p \sim Q'$. Близкой к оптимальному значению является частота вращения 5–10 об/с. При этом достигаются высокие проводимость системы и чувствительность, а также обеспечивается достаточно большой сигнал переменного ионного тока, поступающий от преобразователя давления.

В вакуумной технике в некоторых случаях, например для измерения потоков углеродсодержащих газов [69, 70] или кислорода и галогенов [74], применяются и другие методы измерения потоков.

16-13. МЕТОДЫ ДОЗИРОВАНИЯ ПОТОКА ГАЗА

При проведении некоторых технологических операций, испытании вакуумной аппаратуры, например при измерении быстроты действия вакуумных насосов, необходимо дозировать поток газа. В зависимости от величины потока применяют разные технические приемы.

Дозирование потоков менее $10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ осуществляют с помощью *калиброванного сопротивления*; в диапазоне потоков газа 10^{-4} — $2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ применяют *бюретки или пипетки*, потоки более $0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ контролируют с помощью *ротаметров*.

Дозирование потока газа менее $10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. Дозирование малых потоков осуществляется по схеме, показанной на рис. 16-4. Необходимый поток Q' задается натекателем 3. Проходя через диафрагму 1, газ создает на ней разность давлений. Величина проводимости U

диафрагмы выбирается такой, чтобы давление газа за диафрагмой было на два-три порядка меньше давления p перед диафрагмой, которое измеряется манометрическим преобразователем 2. В этих условиях поток

$$Q' = pU. \quad (16-48)$$

Погрешность дозирования определяется погрешностью измерения давления p . Наиболее точные измерения давления удается произвести в диапазоне промышленных разрежений от 10^3 до 10^5 Па. Требование молекулярного режима течения газа при столь высоких давлениях приводит к необходимости создания сопротивления течению газа с проводимостью примерно 10^{-5} л/с и каналом диаметром не более 0,1 мкм. Такие сопротивления могут быть реализованы

на основе использования пористых стекол. Пористые стекла механически прочны и могут работать начиная с атмосферного давления, но требуют защиты от паров масел. Перегородки с проводимостью более 10^{-3} л/с могут быть изготовлены из тонкой медной фольги с отверстием, образованным лучом лазера. Такие перегородки допускают работу с парами веществ, но менее прочны, и их можно использовать при давлениях не более 10^2 Па.

Дозирование потоков в диапазоне 10^{-4} — $2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. Напуск газа (рис. 16-5) в вакуумную систему осуществляется с помощью натекателя 5, соединенного шлангом 3 с верхним концом бюретки 2. К верхнему концу бюретки припаивается также стеклянный кран 1, соединяющий бюретку 2 с атмосферой. При необходимости через кран 1 в систему может быть подан любой рабочий газ. Нижний конец бюретки погружен в стакан 4 с вакуумным маслом.

С помощью натекателя 5 устанавливают необходимое давление p в вакуумной системе. При закрытии крана 1 масло в бюретке начинает подниматься. По скорости подъема масла в бюретке 2 ($n/\Delta t$) определяют

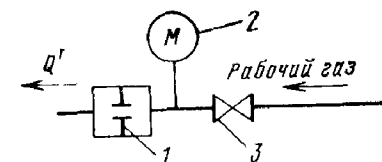


Рис. 16-4. Принципиальная схема системы для дозирования потока менее $10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

количество вытесненного из бюретки воздуха $\Delta(pV)$. Поток газа Q' равен:

$$Q' = \frac{\Delta(pV)}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (V_0 \Delta p + p_6 \Delta V + \Delta p \Delta V), \quad (16-49)$$

где Δt — время поднятия столба масла в бюретке; V_0 — начальный объем бюретки 2 и соединительного шланга 3 до запорного элемента натекателя 5; Δp — изменение давления газа в бюретке, равное давлению столба масла, поднявшегося за время Δt ; p_6 — барометрическое давление; ΔV — изменение объема газа в бюретке, равное объему столба масла, поднявшегося за время Δt :

$$\Delta V = \frac{V_0}{n} h, \quad (16-50)$$

где V_0 — объем градуированной части бюретки; n — число делений градуированной части бюретки; h — высота поднятия масла в бюретке за время Δt в делениях градуированной части бюретки;

$$\Delta p = \rho g h, \quad (16-51)$$

где ρ — плотность масла; g — ускорение силы тяжести. Так как $\Delta p \Delta V$ в уравнении (16-49) мало в сравнении с двумя первыми слагаемыми, то им можно пренебречь и тогда получим:

$$\Delta(pV) \approx V_0 \Delta p + p_6 \Delta V. \quad (16-52)$$

На основании уравнений (16-50) — (16-52) получим:

$$Q' = k_5 \frac{h}{\Delta t}, \quad (16-53)$$

где $k_5 = V_0 \rho g + \frac{p_6 V_0}{h}$ — коэффициент бюретки.

Для ответственных измерений p_6 определяется в каждом отдельном случае. При более грубых измерениях принимается среднее барометрическое давление газа для данной местности.

При дозировании потока с использованием бюретки необходимо следить за стабильностью температуры во время измерений. Изменение температуры на 1°C может привести к дополнительной ошибке в несколько десятков процентов.

Дозирование потоков более $0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Потоки газа более $0,2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ могут быть дозированы с помощью ротаметров, в которых используется сопротивление движению потока газа, создаваемое поплавком, находящимся в вертикальной конической трубе.

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

17-1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ВАКУУМНЫМ СИСТЕМАМ

В зависимости от назначения технологической установки к ее вакуумной системе может быть предъявлен ряд требований, выполнение которых обеспечивает возможность проведения необходимого технологического процесса, осуществляемого в вакууме.

1. Вакуумная система должна обеспечить получение требуемого давления в откачиваемом объеме. Так, установка, предназначенная для откачки ЭВГ, должна иметь вакуумную систему, обеспечивающую получение и поддержание разрежения в приборе на таком уровне, который исключает отравление катода и загрязнение других элементов прибора при достаточно быстром его обезгаживании прогревом. Для удовлетворения этого требования вакуумная система должна быть герметичной и снабжена соответствующими средствами откачки, измерения давления, коммутирующими и разъемными элементами.

Важным условием выполнения этого требования является подбор материалов, из которых будут изготовлены вакуумная система и ее элементы, а также методы подготовки вакуумной системы к работе.

2. Вакуумная система должна обеспечить возможность получения требуемой быстроты откачки объема. Для этого вакуумная система должна иметь определенную проводимость, а примененный вакуумный насос должен обладать необходимой быстротой действия.

3. Вакуумная система должна быть снабжена устройствами для контроля ряда параметров, характеризующих ее состояние.

К таким основным параметрам относятся общее и парциальные давления остаточных газов, скорость собственного газовыделения вакуумной системы, скорость накопления отдельных газов и паров в вакуумной системе и т. д.

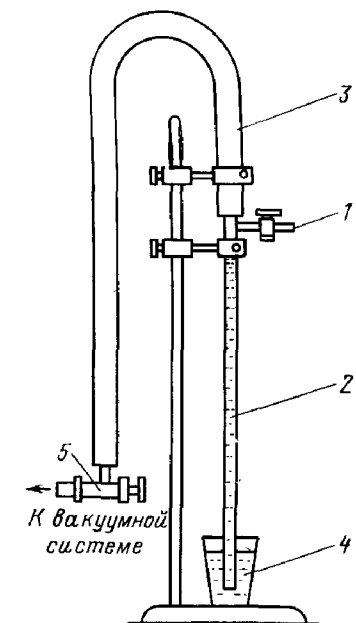


Рис. 16-5. Схема измерительной бюретки.

1 — трехходовой кран; 2 — бюретка; 3 — соединительный резиновый шланг; 4 — стакан с вакуумным маслом; 5 — кран-натекатель.

Для контроля и измерения этих параметров вакуумную систему снабжают преобразователями давления, масс-спектрометрами, потокомерами и другими измерительными приборами.

4. При применении автоматических систем управления технологическими процессами (АСУТП) вакуумная система должна быть оснащена набором различных датчиков, осуществляющих передачу информации на ЭВМ. Используемые в вакуумной системе коммутирующие элементы должны быть автоматизированы, а средства откачки — высокопроизводительными и долговечными.

5. Технологический процесс, осуществляемый на вакуумных установках, часто длится многие десятки часов, поэтому вакуумная система должна быть высоконадежной при эксплуатации и иметь длительный межремонтный период. Это требование вызвано также и тем, что необходимо поддерживать вакуумную систему в рабочем состоянии в течение как можно большего времени. Вакуумная система, длительно не контактирующая с атмосферой (особенно это относится к высоковакуумным магистралям), с течением времени обезгаживается, снижается ее собственное газовыделение и повышается эффективность ее работы.

Целесообразно рассмотреть принципы построения вакуумных систем на примере технологического оборудования для изготовления электронных приборов, включающего практически все типовые элементы.

17-2. НЕПРОГРЕВАЕМЫЕ ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ

Принципиальные схемы вакуумных систем, нашедших применение в постах откачки ЭВП, работающих в диапазоне давлений от 10^{-2} до $5 \cdot 10^{-5}$ Па, приведены в табл. 17-1.

Вакуумная система, построенная по схеме 1 табл. 17-1, состоит из пароструйного диффузионного насоса 1 с механической ловушкой 4 и механического вакуумного насоса 2. Измерение давления в различных участках вакуумной системы производится манометрическими преобразователями 6, 8. Высоковакуумный затвор 5 изолирует вакуумную систему от контакта с атмосферой во время установки нового изделия. Применение линии предварительной откачки с краном 10 исключает непроизводительные потери времени на охлаждение и разогрев пароструйного диффузионного насоса. При откачке воздуха из прибора через линию предварительного разрежения диффузионный насос 1 работает на форвакуумный баллон 3, который отделен в это время от насоса 2 электромагнитным клапаном 9. Клапан 9 выполняет также роль защитного устройства, предотвращающего прорыв атмосферы и попадание масла из механического насоса 2 в диффузионный насос 1 при обесточивании вакуумной системы или остановке насоса 2. Для исключения проникновения масла из механического насоса 2 в клапан 9 и кран 10 предусматривают электромагнитный клапан-напекатель 11, с помощью которого при выключении вакуумной системы пространство над входным патрубком механического насоса 2 сообщается с атмосферой.

Для обработки газонаполненных приборов в вакуумной системе может быть установлен дополнительный вентиль-напекатель 12, с помощью которого откачиваемое изделие заполняется газом.

Принципиальные схемы непрогриваемых вакуумных систем

Номер схемы	Схема	Краткая техническая характеристика	Средства откачки	Применение
1		$P_{пред} = 5 \cdot 10^{-5}$ Па. Рабочий объем насоса соединяется через металлический уплотнитель	Пароструйный диффузионный насос. Механический вакуумный насос с форвакуумным баллоном	Индивидуальный откачной пост
2		Те же	Пароструйный диффузионный насос. Бустерный насос. Механический вакуумный насос с форвакуумным баллоном	Применяется в откачных постах и печах вакуумного отжига с большой газовой нагрузкой

Номер схемы	Схема	Краткая техниче- ская ха- ракте- ристика	Средства откачки	Применение
3		$p_{пред} = 5 \cdot 10^{-5}$ Па. Рабочий объем присоединяется через металлический уплотнитель.	Пароструйный высоковакуумный насос с механической ловушкой. Два механических вакуумных насоса.	Индивидуальный откачной пост, работающий по системе «вакуум в вакууме».
4		$p_{пред} = 1 \cdot 10^{-2}$ Па. Рабочий объем присоединяется через резиновый уплотнитель.	Двухроторный вакуумный насос. Механический вакуумный насос.	Индивидуальные посты для откачки ПУЛ и газонаполненных приборов.
5		То же	Два адсорбционных насоса. Механический вакуумный насос.	Лабораторный пост для безмасляной откачки вакуумных и газонаполненных приборов.

В вакуумной системе, построенной по схеме 2 табл. 17-1, выпускной патрубок пароструйного диффузионного насоса 1 с механической ловушкой 4 присоединен к бустерному насосу 10, работающему на форвакуумный баллон 3 и механический вакуумный насос 2. Для напуска воздуха в насос 2 при его остановке предусмотрен клапан 11. Установка бустерного насоса между пароструйным и механическим вакуумными насосами обеспечивает возможность проведения технологического процесса с интенсивным газовойделением и получения в конечном счете достаточно низкого предельного остаточного давления. Важными преимуществами этой системы являются хорошие обезгаживающие рабочие жидкости пароструйного диффузионного насоса, а также предотвращение попадания паров рабочей жидкости из механического вакуумного насоса 2 в кипятильник высоковакуумного насоса 1. Практически такая система обеспечивает получение разрежения 10^{-3} Па и ниже.

Высоковакуумная откачка изделия производится через затвор 5. Предварительная откачка изделия осуществляется механическим вакуумным насосом 2 через кран 6. Во время этой откачки кран 7 закрыт, а насос 10 работает на форвакуумный баллон 3. Для измерений давления предусмотрены манометрические преобразователи 8, 9 и 12. Такая схема часто применяется при эксплуатации пароструйных диффузионных насосов с большой быстротой действия.

Вакуумная система, построенная по схеме 3 табл. 17-1, нашла широкое применение в установках для откачки металлостеклянных и металлокерамических изделий. Основным отличием этой системы является наличие вакуумного защитного колпака 5, откачиваемого до давления примерно 10 Па через электромагнитный клапан 8 механическим вакуумным насосом 14 [61].

Создание вокруг изделия 15 области с пониженным давлением (откачка по системе «вакуум в вакууме») предотвращает окисление внешней поверхности при нагреве изделия во время его обезгаживания и значительно снижает скорость проникновения газов из окружающей среды в стенки прибора и его внутреннюю полость. Давление в колпаке измеряется манометрическим преобразователем 11. Напуск атмосферы в колпак перед его подъемом производится через электромагнитный клапан-накататель 10. Предварительная откачка изделия осуществляется через кран 7, присоединенный к механическому вакуумному насосу 14, откачивающему колпак. По достижении заданного предварительного разрежения в изделии 15 кран 7 закрывается, и открывается высоковакуумный кран 3, который сообщает полость изделия с пароструйным высоковакуумным насосом 1, снабженным механической ловушкой 4. Выпускной патрубок насоса 1 через электромагнитный клапан 6 соединен с механическим вакуумным насосом 2. Клапаны 12 и 13 служат для напуска атмосферы в насосы 1, 2 и 14 после их выключения. Для измерения давления предусмотрены манометрические преобразователи 9 и 11.

Вакуумная система, построенная по схеме 4 табл. 17-1, состоит из двухроторного вакуумного насоса 1, механического вакуумного насоса 2, крана 5, предназначенного для отделения откачиваемого объема от вакуумной системы, и кранов 4 и 6, служащих для напуска атмосферы соответственно в откачиваемый объем и вакуумную систему. Для измерения давления в вакуумной системе предусмотрен манометрический преобразователь 3. Систему целесообразно

применять для откачки ПУЛ, а также объемов с рабочими давлениями $1 \cdot 10^{-1}$ — $1 \cdot 10^{-2}$ Па. Преимуществами системы являются малое время пуска и некоторое упрощение ввиду отсутствия необходимости в линии предварительной откачки.

Вакуумная система, построенная по схеме 5 табл. 17-1, может применяться для откачки ПУЛ до давлений $1 \cdot 10^{-2}$ — $1 \cdot 10^{-3}$ Па и состоит из двух адсорбционных насосов 1 и 1', механического вакуумного насоса 2 и кранов 3, 4, 4', 5, 6, 6'. Для измерения давления в системе предусмотрены манометрические преобразователи 7 и 9. Система работает следующим образом.

Краны 3, 4', 5, 6 закрыты, и откачка изделия ведется адсорбционным насосом 1 через кран 4. При этом насос 1' регенерируется нагревом с откачкой механическим вакуумным насосом 2 через кран 6'. После насыщения насоса 1 откачка производится насосом 1', а насос 1 ставится на регенерацию. С целью уменьшения времени достижения предельного давления и удлинения срока работы без регенерации производят предварительную откачку изделия механическим вакуумным насосом 2 через кран 3. Однако при этом не исключается возможность загрязнения вакуумной системы маслом из механического вакуумного насоса. Целесообразнее предварительную откачку изделия производить одним из адсорбционных насосов, условно называемым «черновым», а окончательную откачку — «чистовым». При выключении механического вакуумного насоса пространство над его выпускным патрубком заполняется азотом или воздухом через кран-натекатель 8. Кран 5 предназначен для наполнения газом из отдельной системы газонаполненных приборов после их откачки.

17-3. ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ

Высоковакуумные системы, предназначенные для получения давлений ниже $5 \cdot 10^{-3}$ Па, должны удовлетворять ряду дополнительных требований.

Первое требование предельно малое собственное газовыделение.

Это требование вытекает из общего для всех вакуумных систем явления: пока давление в системе еще относительно высоко, весь ход откачки определяется количеством газа, имеющегося в объеме рабочей камеры или откачиваемого прибора; по сравнению с этим газом количество газа, выделяющегося со стенок вакуумной системы и ее элементов, мало. По мере дальнейшей откачки с понижением давления количества газа, имеющиеся в откачиваемом объеме и выделяющиеся со стенок, становятся сравнимыми, и, чтобы газовыделение со стенок не замедлило откачки и не препятствовало получению высокого вакуума, необходимо вакуумную систему и откачиваемый объем тщательно обезгазить. Обычно обезгаживание осуществляется высокотемпературным (600—1000 К) прогревом в течение нескольких часов с одновременной откачкой. Поэтому материалы для сверхвысоковакуумных систем и их деталей не только должны иметь малые скорости собственного газовыделения, но и допускать прогрев до требуемой температуры.

Все разъемные соединения в сверхвысоковакуумных системах выполняются, как правило, с использованием металлических уплот-

нителей, хотя не исключается возможность применения высококачественных синтетических уплотнителей, разработанных в последнее время.

Второе требование — предельно малое натекание газа через течи. Высокая герметичность вакуумной системы может быть обеспечена лишь тщательным изготовлением и надежным контролем вакуумной плотности в процессе сборки системы.

Третье требование — возможно лучшая защита сверхвысоковакуумной системы от проникновения паров рабочей жидкости насосов — предъявляется в тех случаях, когда применяют пароструйные диффузионные насосы.

Следует отметить, что в настоящее время в сверхвысоковакуумных системах нашли широкое применение безмасляные средства откачки, исключающие загрязнение вакуумной системы парами рабочей жидкости.

В табл. 17-2 приведены принципиальные схемы высоковакуумных систем.

В вакуумной системе, построенной по схеме 1 табл. 17-2, предварительная откачка изделия производится механическим вакуумным насосом 7, снабженным адсорбционной ловушкой или фильтром 13, через цельнометаллический прогреваемый кран 9 и электромагнитный клапан 12. Высоковакуумная откачка осуществляется через цельнометаллический кран 3 пароструйным высоковакуумным насосом 1, снабженным прогреваемой двухъярусной жалюзийной ловушкой 2. Во время работы системы оба яруса ловушки охлаждаются жидким азотом. Выпускной патрубок насоса 1 через электромагнитный клапан 5 соединяется с механическим вакуумным насосом 6. При выключении насосов 6 и 7 пространство над их входными патрубками заполняется воздухом через клапаны-накатели 10 и 11. Давление в системе измеряется манометрическими преобразователями 4 и 8.

В вакуумной системе, построенной по схеме 2 табл. 17-2, в качестве сверхвысоковакуумного насоса используется ионно-геттерный или магнитный электроразрядный насос 1, который производит откачку изделия через цельнометаллический прогреваемый кран 2 [50].

Для откачки сверхвысоковакуумного насоса и вакуумной системы при их обезгаживании, а также для создания предварительного разрежения в изделии предназначен пароструйный высоковакуумный насос 5 с азотной ловушкой 4. В случае применения магнитного электроразрядного насоса откачку системы при обезгаживании и предварительную откачку изделия часто производят одним лишь механическим вакуумным насосом, снабженным адсорбционной или азотной ловушкой.

В вакуумной системе по схеме 2 табл. 17-2 откачка изделия до давления 5 Па осуществляется механическим вакуумным насосом 6 через холодный насос 5. Насос 5 может быть отделен от сверхвысоковакуумной части системы цельнометаллическим прогреваемым краном 3. Выпускной патрубок пароструйного высоковакуумного насоса 5 соединен с механическим вакуумным насосом 6 через электромагнитный клапан 9. Напуск атмосферы в насос 6 производится через клапан-натекатель 10. Для измерения давления предусмотрены манометрические преобразователи 7 и 8.

Вакуумная система, построенная по схеме 3 табл. 17-2, представляет собой систему с защитным вакуумным колпаком.

Принципиальные схемы высоковакуумных систем

Номер схем	Схема	Краткая техническая характеристика	Средства откачки	Применение
1		$P_{пред} = 5 \cdot 10^{-7}$ Па. Рабочий объем присоединяется через металлический уплотнитель.	Сверхвысоковакуумный агрегат. Два механических вакуумных насоса	Откачной пост для обработки крупных металлокерамических приборов
2		$P_{пред} = 5 \cdot 10^{-7}$ Па. Рабочий объем присоединяется через металлический уплотнитель или напайкой через стеклянный штенгель	а) Ионно-теттерный насос; пароструйный диффузионный и механический вакуумный насос б) Магнитный электро-разрядный насос и механический вакуумный насос	Индивидуальные сверхвысоковакуумные откачные посты для обработки особо надежных или малозащущающих приборов

Продолжение табл. 17-2

Номер схем	Схема	Краткая техническая характеристика	Средства откачки	Применение
3		$P_{пред} = 5 \cdot 10^{-7}$ Па. Рабочий объем присоединяется через металлический уплотнитель	а) Магнитный электро-разрядный насос. Два механических вакуумных и два адсорбционных насоса б) Магнитный электро-разрядный насос и два механических вакуумных насоса	Индивидуальный откачной пост для обработки приборов средней мощности
4		$P_{пред} = 5 \cdot 10^{-7}$ Па. Рабочий объем присоединяется через металлический уплотнитель	Турбомолекулярный насос. Два механических вакуумных насоса	Индивидуальный откачной пост для обработки крупных металлокерамических приборов

№ схемы	Схема	Краткая техническая характеристика	Средства откачки	Применение
5		<p>$P_{\text{пред}} = 5 \cdot 10^{-7}$ Па. Рабочий объем присоединяется через металлический уплотнитель</p>	<p>Магнитный электроразрядный насос. Два титановых сорбционных насоса. Два механических вакуумных насоса</p>	<p>Индивидуальные откатные посты для образцов маломощных приборов, металлокерамических приборов малой мощности и приборов с фотокаатодом</p>

Предварительная откачка магнитного электроразрядного насоса 1 и вакуумной системы при их обезгаживании, а также предварительная откачка изделия 4 производится через цельнометаллический кран 17 и краны 15 или 21.

В качестве насосов предварительного разрежения могут быть применены адсорбционные насосы 10 и 14 либо механический вакуумный насос с защитным устройством (адсорбционной или азотной ловушкой). Откачка во время регенерации насосов 10 и 14 производится механическим вакуумным насосом 9 через краны 12 и 13.

Сверхвысоковакуумная откачка изделия осуществляется магнитным электроразрядным насосом 1 через цельнометаллический кран 3. Конструктивно краны 3 и 17 могут быть оформлены в блок с одним электродвигательным приводом. Защитный вакуумный колпак 18 откачивается механическим вакуумным насосом 8 через электромагнитный клапан 7. Напуск атмосферы в колпак перед его подъемом и в насосы 8 и 9 осуществляется соответственно с помощью клапанов-напекателей 6, 11 и 20. Для измерения давления в разных участках вакуумной системы предусмотрены манометрические преобразователи 2, 5, 16 и 19.

Вакуумные системы, выполненные по схеме 4 табл. 17-2, нашли применение в постах для откачки крупных металлокерамических электроразрядных приборов.

Предварительная откачка изделий производится через прогреваемый кран 4 механическим вакуумным насосом 16, снабженным ловушкой 8. С целью увеличения срока службы ловушки после предварительной откачки изделия она отключается клапаном 9 от насоса 16.

Высоковакуумная откачка прибора 1 производится через прогреваемый кран 6 турбомолекулярным насосом 7. Насос 7 в свою очередь откачивается через кран 10 механическим вакуумным насосом 16. Откачка защитной камеры 2 производится через кран 15 механическим вакуумным насосом 17. Иногда защитная камера 2 заполняется через кран 14 инертным газом, например аргоном.

После выключения вакуумной системы в турбомолекулярный насос через кран 5 напускают сухой азот, а в насосы 16 и 17 через краны 11 и 12 — воздух. Давление в системе измеряется манометрическими преобразователями 3 и 13. В вакуумной системе, построенной по схеме 5 табл. 17-2, для высоковакуумной откачки прибора 2 через кран 4 применена комбинация титанового испарительного насоса 16 и магнитного электроразрядного насоса 17.

Испарительный насос служит для интенсивной откачки химически активных газов (кислорода, водорода, азота и т. д.), а магнитный электроразрядный насос в основном предназначен для откачки инертных газов (гелия, аргона, неона и т. д.) и метана.

Предварительная откачка изделия 2 осуществляется через цельнометаллический прогреваемый кран 5 и кран с резиновым уплотнением 12 безмасляной системой, состоящей из механического вакуумного насоса 15 с адсорбционной ловушкой 10 и титанового испарительного насоса 9. Вначале изделие откачивается механическим вакуумным насосом 15 до давления 5 Па, а затем — испарительным насосом до давления 10^{-2} — 10^{-3} Па.

Откачка защитного колпака 1 производится через кран 11 механическим вакуумным насосом 14. Для напуска воздуха в защит-

ный колпак и в механические вакуумные насосы после их остановки предусмотрены краны 7, 13 и 18.

Давление в различных участках вакуумной системы измеряют с помощью манометрических преобразователей 3, 6 и 8.

17-4. ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ КАРУСЕЛЬНЫХ И КОНВЕЙЕРНЫХ МАШИН

Как уже отмечалось, применение карусельных и конвейерных машин позволяет значительно повысить производительность труда по сравнению с откачкой на индивидуальных постах за счет сокращения вспомогательного времени и увеличения числа откачных гнезд.

Откачные позиции конвейерных машин представляют собой независимые вакуумные системы. Часто вакуумные системы карусельных машин выполняются таким образом, что с каруселью перемещаются только откачное гнездо и часть вакуумной системы, в то время как другая часть системы остается неподвижной. При этом коммутация между подвижной и неподвижной частями выполняется золотником. Применение золотника, который также играет роль многоходового вакуумного крана, значительно упрощает конструкцию карусельных машин, управление их вакуумными системами и дает возможность снизить массу и габариты вращающихся частей машины.

Золотник может быть расположен как в области высокого, так и в области низкого вакуума. В силу недостаточной герметичности золотника и удлинения вакуумных коммуникаций наблюдается существенное повышение давления за золотником по сравнению с давлением на впускном патрубке соответствующего насоса.

В табл. 17-3 приведены принципиальные вакуумные схемы конвейерных и карусельных машин.

Вакуумная система, построенная по схеме 1 табл. 17-3, состоящая из пароструйного диффузионного насоса 1 и механического вакуумного насоса 2, применяется в конвейерных агрегатах откачки ЭЛТ. Насосы 1 и 2, откачное гнездо с изделием 3 и электрический блок скомпонованы в единый пост, который перемещается на конвейере. Недостатком системы следует считать необходимость в периодическом охлаждении пароструйного диффузионного насоса перед каждой установкой нового изделия. Конвейерная линия для откачки ЭЛТ содержит по 165 таких постов.

Вакуумная система, построенная по схеме 2 табл. 17-3, применена в 16-позиционном откачном полуавтомате. Основным достоинством вакуумной системы является отсутствие коммутирующего золотника [51]. Шестнадцать откачных позиций разбиты на четыре группы, каждая из которых обслуживается одним многокамерным механическим вакуумным насосом 7, помещенным на нижней части карусели. Предварительная откачка изделия 17 производится через кран 3 одной из камер многокамерного механического вакуумного насоса. Эта же камера насоса используется для окончательной откачки через клапан 4 защитного колпака 6. Предварительная откачка колпака 6 выполняется стационарным механическим вакуумным насосом 10 через электромагнитный клапан 13 и клапан 5, управляемый механическим приводом 11. Впуск атмосферного воздуха в колпак перед его подъемом производится через электромагнитный клапан 12 и клапан 5. В это время клапан 13 закрыт. При

повороте карусели механизм 11 разобьет клапан 5 и стационарную вакуумную систему предварительной откачки и наполнения колпака.

Использование стационарного вакуумного насоса 10 для черновой откачки колпака улучшает условия эксплуатации многокамерных насосов 7, часть камер которых в дальнейшем производит окончательную откачку колпаков.

Окончательная откачка изделия производится через высоковакуумный клапан 8 пароструйным диффузионным насосом 1, снабженным маслоотражателем 2. Электромагнитные клапаны 3 и 8 выполнены в едином корпусе. Выходной патрубок диффузионного насоса через электромагнитный клапан аварийного закрытия 9 соединен с одной из камер многокамерного механического вакуумного насоса 7. Основным назначением электромагнитного клапана 9 является предотвращение попадания атмосферы и масла в насос 1 из насоса 7 при аварийном обесточивании системы [48]. Напуск воздуха в насос 7 производится через клапан 14. Для измерения давления в разных участках вакуумной системы предусмотрены манометрические преобразователи 15 и 16.

В вакуумной системе, выполненной по схеме 3 табл. 17-3, откачка изделий 5 ведется в три этапа: в начале технологического цикла производится черновая откачка изделий насосом 3, затем предварительная откачка изделий многокамерным механическим насосом 2, и наконец, изделия проходят обработку при откачке пароструйными диффузионными насосами 1.

В этой схеме золотник 4 расположен между откачным гнездом и пароструйным диффузионным насосом, и для надежной работы золотника его вакуумные каналы защищены кольцевыми проточками, заполняемыми маслом либо откачиваемым механическим вакуумным насосом. Вакуумные системы с таким расположением золотника даже при тщательном изготовлении всех элементов обеспечивают давление в системе, которое измеряют манометрическим преобразователем 6, не ниже 0,1 Па из-за большой протяженности высоковакуумных коммуникаций и негерметичности золотника.

В вакуумной системе, выполненной по схеме 4 табл. 17-3, золотник 4 расположен в области предварительного разрежения, вследствие чего в системе можно обеспечить меньшее давление, чем в предыдущем случае.

Предварительная откачка изделия 5 и насоса 1 производится отдельным механическим вакуумным насосом 3. Дальнейшая откачка пароструйных насосов выполняется многокамерным насосом 2. Вакуумные системы, построенные по схеме 4 табл. 17-3, применяются в карусельных машинах откачки с длительным технологическим циклом, продолжительность которого достаточна для охлаждения пароструйного насоса на одной-двух позициях.

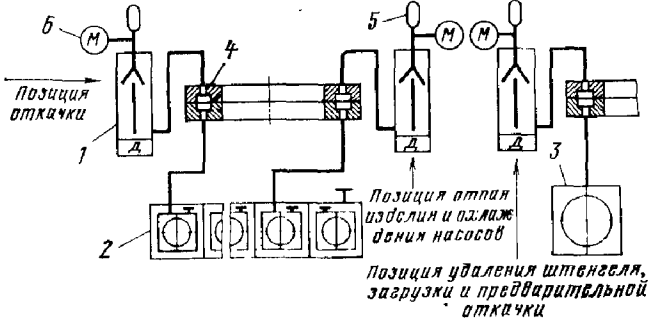
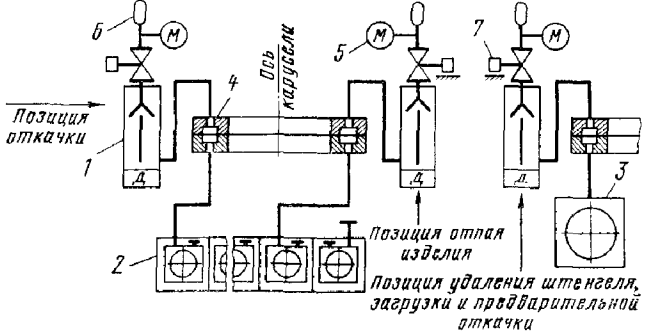
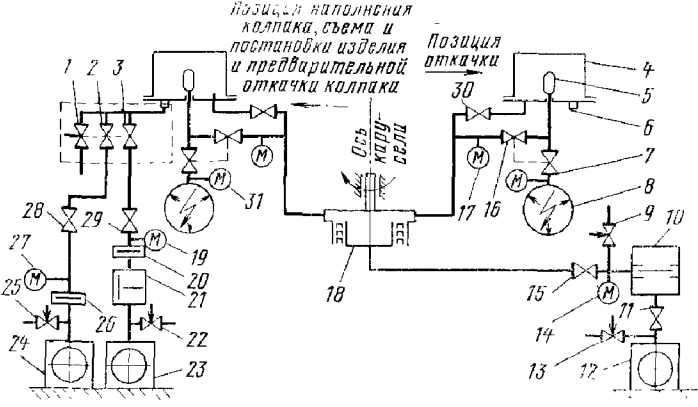
При применении в пароструйных диффузионных насосах рабочих жидкостей с высокой термоокислительной устойчивостью предварительная откачка изделия производится механическим вакуумным насосом через горячий пароструйный диффузионный насос. При этом повышается производительность машины, так как исключается время, необходимое на остывание и разогрев насоса 1.

Отличительной особенностью вакуумной системы, построенной по схеме 5 табл. 17-3 и имеющей золотник 4 также в области предварительного разрежения, является наличие клапана 7, который исключает необходимость охлаждения пароструйного диффузионного насоса 1 перед постановкой нового изделия 6. В остальном

Принципиальные вакуумные схемы карусельных и конвейерных машин

машин

Номер схемы	Схема	Краткая техническая характеристика	Средства откачки	Применение
1		$p_{\text{пред}} = 5 \cdot 10^{-4}$ Па. Изделие присоединяется через резиновый уплотнитель	Пароструйный диффузионный насос. Механический вакуумный насос	Конвейерный агрегат для откачки ЭЛТ
2		$p_{\text{пред}} = 1 \cdot 10^{-4}$ Па. Изделие присоединяется через металлический штенгель	Пароструйный диффузионный насос. Многокамерный механический вакуумный насос или ЦФС	Карусельная машина для откачки металло-стеклянных СВЧ вакуумных приборов
3		$p_{\text{пред}} = 4 \cdot 10^{-1}$ Па. Изделие присоединяется через резиновый уплотнитель	Пароструйный диффузионный насос. Многокамерный механический вакуумный насос или ЦФС	Карусельная машина для откачки ПУЛ и стабилизаторов напряжения

Номер схемы	Схема	Краткая техническая характеристика	Средства откачки	Применение
4	 <p>Позиция откачки</p> <p>Позиция отпая изделия и охлаждение насосов</p> <p>Позиция удаления штенгеля, загрузки и предварительной откачки</p>	<p>$P_{пред} = 1 \cdot 10^{-4}$ Па.</p> <p>Изделие присоединяется через металлический штенгель</p>	<p>Пароструйный диффузионный насос. Многокамерный механический вакуумный насос. Механический вакуумный насос или ЦФС</p>	<p>Карусельная машина для откачки электровакуумных металлических и стеклянных приборов</p>
5	 <p>Позиция откачки</p> <p>Ось карусели</p> <p>Позиция отпая изделия</p> <p>Позиция удаления штенгеля, загрузки и предварительной откачки</p>	<p>То же</p>	<p>То же</p>	<p>То же</p>
6	 <p>Позиция наполнения колпака, съема и постановки изделия и предварительной откачки колпака</p> <p>Позиция откачки</p>	<p>$P_{пред} = 5 \cdot 10^{-6}$ Па.</p> <p>Изделие присоединяется через металлический штенгель</p>	<p>Магнитный электро-разрядный насос. Трубомолекулярный насос. Двухроторный вакуумный агрегат. Два механических вакуумных насоса</p>	<p>Карусельная машина для откачки особо надежных металло-стеклянных приборов</p>

система повторяет предыдущую и используется в карусельных откачных машинах с более коротким технологическим циклом.

Вакуумная система, выполненная по схеме 6 табл. 17-3, применяется в 16-позиционном сверхвысоковакуумном откачном полуавтомате, предназначенном для обработки особо надежных приборов.

Предварительная откачка изделия 5 до давления примерно 1 Па производится через кран 16, подвижное вакуумное соединение 18, кран 15 турбомолекулярным насосом 10. Выпускной патрубок насоса через электромагнитный клапан 11 соединен с механическим вакуумным насосом 12.

Высоковакуумная откачка изделия до давления $1 \cdot 10^{-5}$ Па осуществляется через кран 7 магнитным электроразрядным насосом 8. Краны 7 и 16 скомпонованы в единый блок (см. рис. 10-11).

Предварительная откачка колпаков 4 осуществляется через клапан 6, блок клапанов предварительной откачки, состоящий из клапанов 1—3 последовательно в два этапа: вначале до давления 10 Па через кран 28 механическим вакуумным насосом 24, снабженным ловушкой 26, а затем — до давления $5 \cdot 10^{-1}$ Па через кран 29 двухроторным вакуумным насосом 21, снабженным ловушкой 20. Выпускной патрубок насоса 21 соединен с механическим вакуумным насосом 23.

Откачка колпаков до давления $5 \cdot 10^{-2}$ Па во время проведения технологического процесса осуществляется через электромагнитный клапан 30, подвижное вакуумное соединение 18, кран 15 турбомолекулярным насосом 10.

Перед подъемом колпака на позиции загрузки через клапан 1 в него напускают азот. При выключении полуавтомата через клапаны-напекатели 9, 13, 22 и 25 в отдельные участки вакуумной системы напускают воздух. Для измерения давления в вакуумной системе предусмотрены манометрические преобразователи 14, 17, 19, 27 и 31.

17-5. ЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ ФОРВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Централизованные форвакуумные системы (ЦФС) в основном предназначаются для откачки вакуумных установок до давления 5 Па или несколько ниже и создания предварительного разрежения на выходе пароструйных диффузионных насосов или запуска магнитных электроразрядных насосов. Применение централизованных форвакуумных систем улучшает условия работы и эксплуатацию вакуумных установок, исключает вибрации, шум и загрязнение воздуха производственных помещений. При этом появляется возможность заменить большое количество механических вакуумных насосов с малой производительностью одним или несколькими насосами с большей производительностью, что повышает коэффициент загрузки насосов и облегчает их обслуживание. На рис. 17-1 представлена схема централизованной многотрубной форвакуумной системы [49].

Насосная станция системы состоит из трех механических вакуумных насосов 10 с электромагнитными кранами 8, электромагнитными клапанами напуска воздуха 9 и манометрических преобразователей 11. Краны 8 и клапаны 9 заблокированы таким образом, что при выключении или внезапной остановке насоса 10 вначале закрывается кран 8 и затем в насос напускается воздух через клапан 9.

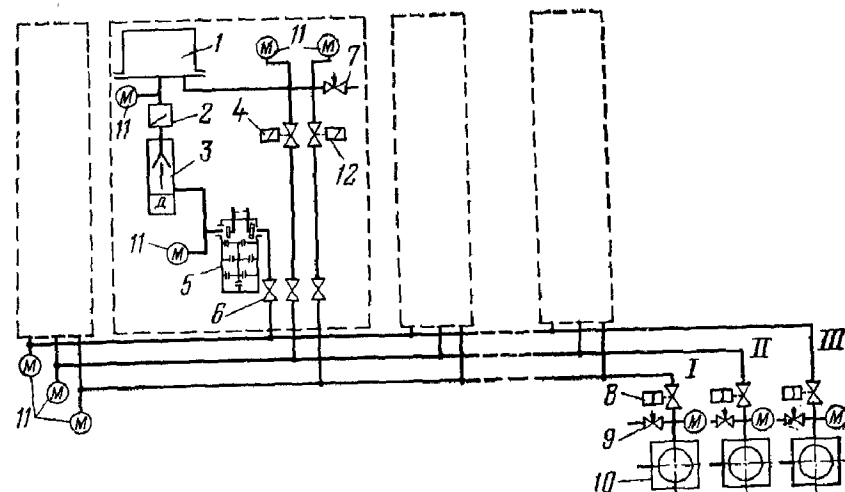


Рис. 17-1. Схема централизованной многотрубной форвакуумной системы.

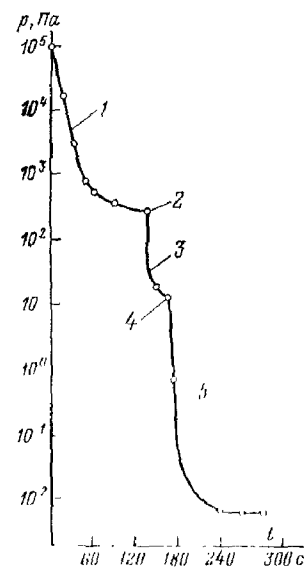


Рис. 17-2. Изменение давления в рабочей камере.

1 — откачка через трубопровод I; 2 — момент открытия клапана 4; 3 — откачка через трубопровод II; 4 — момент открытия клапана 12; 5 — откачка камеры через затвор 2 пароструйным диффузионным насосом 3, работающим на трубопровод III.

Трубопровод I, откачиваемый насосом 10, предназначен для создания предварительного разрежения $(1-4) \cdot 10^2$ Па в вакуумных системах установок.

Трубопровод II служит для создания в рабочих объемах установок разрежения 15-5 Па, достаточного для включения пароструйных диффузионных насосов 3.

Трубопровод III предназначен для постоянной откачки пароструйных диффузионных насосов 3 через предохранительные устройства 5.

Вакуумные системы установок снабжены электромагнитными клапанами 4, 12 и кранами 6, 7, управление которыми осуществляется блоком контроля вакуума. Блок контроля вакуума по достижении в камере I давления $(1-5) \cdot 10^2$ Па дает команду на ее отъединение от трубопровода I, а после достижения давления 5 Па — от трубопровода II и на открытие затвора 2. В качестве датчика давления в блоке контроля вакуума используются манометрические преобразователи 11.

В централизованных форвакуумных системах, откачивающих установки с пароструйными диффузионными или турбомолекулярными насосами, для защиты трубопровода III от попадания в него воздуха при выходе из строя одной из установок применяются предохранительные устройства 5 (см. рис. 10-12).

На рис. 17-2 приведена кривая изменения давления во времени (кривая откачки) в рабочей камере объемом около 20 л, подключаемой к ЦФС.

Как видно из рисунка, длительность откачки объема от атмосферного давления до давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па составляет менее 5 мин.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Некоторые параметры газов

Газ или пар	$\lambda \cdot 10^5 \cdot \frac{10^5}{273}$	$\sigma \cdot 10^{10}$	C	M	$10^{20} \tau$	$10^{-2} u_a$		$10^{-27} N_u$	$10^{-2} M'$	$P_{\text{взр.}} \cdot 10^3$	T	$\eta \cdot 10^5$
						273 K	298 K					
H ₂	11,04	2,75	84,4	2,016	0,3347	16,93	17,70	11,23	0,3759	0,118	192,3 272,1 273,1 293,1 524,5	0,666 0,830 0,842 0,887 1,298
He	17,53	2,18	80	4,003	0,6646	12,01	12,56	7,969	0,5297	0,235	15,6 273,1 293,1 457,7	0,272 1,876 1,970 2,699
Ne	12,42	2,60	56	20,18	3,351	5,355	5,594	3,550	1,190	1,180	194,7 273,1 288,1 717,6	2,367 2,973 3,076 5,584
Воздух	5,98	3,74	112	28,92	4,811	4,468	5,668	2,962	1,425	1,70	194,7 273,1 293,1 573,1 943,8	1,303 1,709 1,808 2,946 4,210

Газ или пар	$\lambda_{273}^{10^5} \cdot 10^8$	$\sigma \cdot 10^{10}$	С	М	$10^{18} m$	$10^{-2} u_a$		$10^{-27} N u$	$10^{-24} M'$	$\rho_{\text{вз}} \cdot 10^3$	Т	$\eta \cdot 10^5$
						273 К	298 К					
O ₂	6,33	3,64	125	32,00	5,313	4,252	4,442	2,819	1,497	1,890	82 273,1 296,1 458,9	0,650 1,920 2,039 2,885
Ar	6,20	3,67	142	39,94	6,631	3,805	3,976	2,523	1,675	2,35	273,1 288,5 373,5 523,1	2,096 2,196 2,688 3,444
CO ₂	3,88	4,65	254	44,01	7,308	3,624	3,787	2,403	1,756	2,60	194,7 273,1 575,1	1,033 1,380 2,682
Kr	4,85	4,15	188	83,7	13,90	2,629	2,747	1,743	2,422	4,88	273,1 289,4 373,1	2,334 2,459 3,063

Газ или пар	$\lambda_{273}^{10^5} \cdot 10^8$	$\sigma \cdot 10^{10}$	С	М	$10^{18} m$	$10^{-2} u_a$		$10^{-27} N u$	$10^{-24} M'$	$\rho_{\text{вз}} \cdot 10^3$	Т	$\eta \cdot 10^5$
						273 К	298 К					
Xe	3,47	4,91	252	131,3	21,80	2,099	2,192	1,392	3,034	7,70	273,1 288,4 373,2	2,107 2,222 2,827
N ₂	5,99	—	102	28,02	4,652	4,542	4,745	3,011	1,402	1,64	195,6 273,1 289,2 523,2	1,273 1,657 1,728 2,630
H ₂ O	—	4,68	659	18,02	2,992	5,665	5,919	3,756	1,124	1,055	273,1 288,1 298,1	0,869 0,926 0,964

С обозначениями: М — молекулярная масса; m — масса молекулы, кг; С — постоянная, характеризующая интенсивность сил притяжения, действующих между молекулами (постоянная Сезерленда); $\lambda_{273}^{10^5}$ — средняя длина свободного пути молекулы, м, при давлении 10^5 Па и температуре 273 К; σ — диаметр молекулы, м; $\rho_{\text{вз}}$ — плотность газа при давлении 133 Па и температуре 273 К, кг/м³; Т — абсолютная температура, К; u_a — средняя скорость, м/с; $N u$ — число молекул, попадающих на 1 м² поверхности за 1 с при температуре 273 К и давлении 10^5 Па; M' — масса газа, соответствующая $N u$, кг/(м²·с); η — коэффициент динамической вязкости газа (или коэффициент внутреннего трения), Па·с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Скорость удельного газовыделения с поверхности металлов и органических материалов при комнатной температуре

Наименование материала	Предварительная обработка материала	Удельный поток газа, десорбирующегося с поверхности, q' , дес ³ /м ² ·Па/(м ² ·с)	Длительность отжига, после которой проводились измерения, ч	Коэффициенты уравнения (3-32)		Примечание
				А дес	В дес	
Малоуглеродистая сталь	—	4,12·10 ⁻⁴	1	-3,236	4,16·10 ⁻⁵	—
		2,4·10 ⁻⁴	2	—	—	—
		1,08·10 ⁻⁴	4	—	—	—
		7,35·10 ⁻⁵	6	—	—	—
		5,36·10 ⁻⁵	8	—	—	—
		4,12·10 ⁻⁵	10	—	—	—
		4·10 ⁻¹⁰ — —1,2·10 ⁻⁸	Практически постоянно	—	—	—
		2,4·10 ⁻⁴	1	-3,467	4,25·10 ⁻⁵	—
		1,08·10 ⁻⁴	2	—	—	—
		5,94·10 ⁻⁵	4	—	—	—
4,12·10 ⁻⁵	6	—	—	—		
3,09·10 ⁻⁵	8	—	—	—		
2,54·10 ⁻⁵	10	—	—	—		
1,7·10 ⁻⁴	1	-3,396	7,33·10 ⁻⁵	—		
1,97·10 ⁻⁵	5	—	—	—		
4·10 ⁻¹⁰ — —1,2·10 ⁻⁸	Практически постоянно	—	—	—		
Необработанная	—	—	—	—	—	
После отжига в вакууме при 673 К	—	—	—	—	—	

Продолжение приложения 2

Наименование материала	Предварительная обработка материала	Удельный поток газа, десорбирующегося с поверхности, q' , дес ³ /м ² ·Па/(м ² ·с)	Длительность отжига, после которой проводились измерения, ч	Коэффициенты уравнения (3-32)		Примечание
				А дес	В дес	
Медь	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	1,11·10 ⁻⁵	1	-4,382	1,04·10 ⁻⁴	—
		8,35·10 ⁻⁷	5	—	—	—
		6,12·10 ⁻⁵	1	-3,918	5,85·10 ⁻⁵	—
		1,03·10 ⁻⁵	5	—	—	—
		1,95·10 ⁻⁴	1	-3,486	3,98·10 ⁻⁵	—
		6,4·10 ⁻⁵	5	—	—	—
		1,06·10 ⁻¹⁰ — —9,3·10 ⁻⁹	Практически постоянно	—	—	—
		1,95·10 ⁻⁵	1	-4,176	9,16·10 ⁻⁵	—
		1,53·10 ⁻⁶	5	—	—	—
		2,22·10 ⁻⁴	1	-3,39	3,7·10 ⁻⁵	—
8,9·10 ⁻⁶	5	—	—	—		
3,34·10 ⁻⁴	1	-3,35	3,14·10 ⁻⁵	—		
1,2·10 ⁻⁴	5	—	—	—		
Латунь	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	1,95·10 ⁻⁵	1	-4,176	9,16·10 ⁻⁵	—
		1,53·10 ⁻⁶	5	—	—	—
		2,22·10 ⁻⁴	1	-3,39	3,7·10 ⁻⁵	—
8,9·10 ⁻⁶	5	—	—	—		
3,34·10 ⁻⁴	1	-3,35	3,14·10 ⁻⁵	—		
1,2·10 ⁻⁴	5	—	—	—		
Необработанная	—	—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—
		—	—	—	—	—

Наименование материала	Предварительная обработка материала	Удельный поток газа, десорбирующегося с поверхности, q' дес./м ² ·Па/(м ² ·с)	Длительность откочки, после которой проводились измерения, ч	Коэффициенты уравнения (3-32)		Примечание
				$A_{\text{дес}}$	$B_{\text{дес}}$	
Дюралюминий	Травление, промывка в бензоле и ацетоне Промывка в бензоле и ацетоне Необработанная	4,73·10 ⁻⁵	1	-3,946	8,12·10 ⁻⁵	—
		3,9·10 ⁻⁶	5	—	—	—
		2,8·10 ⁻⁴ 1,4·10 ⁻⁴	1 5	-3,231 —	3,48·10 ⁻⁵ —	— —
Сварной шов на лагунной трубе	—	5,55·10 ⁻³ 2,22·10 ⁻³	1 5	-2,483 —	9,5·10 ⁻⁶ —	— —
		2,78·10 ⁻² 7,23·10 ⁻³	1 5	-1,927 —	1,2·10 ⁻⁵ —	— —
Алюминий	—	(4÷9)·10 ⁻⁶	2	—	—	—
Никель	—	(6,5÷8)·10 ⁻⁶	2	—	—	—

Продолжение приложения 2

Наименование материала	Предварительная обработка материала	Удельный поток газа, десорбирующегося с поверхности, q' дес./м ² ·Па/(м ² ·с)	Длительность откочки, после которой проводились измерения, ч	Коэффициенты уравнения (3-32)		Примечание
				$A_{\text{дес}}$	$B_{\text{дес}}$	
Молибден	—	(4,6÷8,5)·10 ⁻⁶	2	—	—	—
Тантал	—	6·10 ⁻⁶	2	—	—	—
Вольфрам	—	1,3·10 ⁻⁶	2	—	—	—
Резина для вакуумных уплотнений	—	1,24·10 ⁻²	10	—	—	В том числе паров органических соединений 4·10 ⁻⁴ м ³ ·с/Па/(м ² ·с)
Полистирол	—	2,67·10 ⁻⁵	10	—	—	В том числе паров органических соединений 1,32·10 ⁻⁵ м ³ ·с/Па/(м ² ·с), осетальное пары воды

Наименование материала	Предварительная обработка материала	Удельный поток газа, десорбирующегося с поверхности, q' , дес/м ² ·Па/(м ² ·с)	Длительность откачки, после которой проводилась измеренная, ч	Коэффициенты уравнения (3-32)		Примечание
				A _{дес}	B _{дес}	
Полиэтиленовая пленка	—	$9,3 \cdot 10^{-5}$	10	—	—	В том числе паров органических соединений $1,3 \times 10^{-5}$ м ³ Па/(м ² ·с), ос- тальное пары воды
Целлофан	—	$1,35 \cdot 10^{-3}$	10	—	—	В том числе паров органических соединений 1×10^{-5} м ³ Па/(м ² ·с), ос- тальное пары воды
Ткань Петринова	—	$9,3 \cdot 10^{-4}$	10	—	—	В том числе паров органических соединений $1,3 \times 10^{-4}$ м ³ Па/(м ² ·с), ос- тальное пары воды

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Удельное газовыделение $q_{газ}$, м³·Па/кг

Металл	Температура, К	Общее количество	Водород	Азот	Окись углерода
Медь	673	$4,22 \cdot 10^{-2}$	$2,23 \cdot 10^{-2}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$1,89 \cdot 10^{-2}$
	873	$1,03 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
	1073	$3,04 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
	1123	$3,24 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
	1173	$3,69 \cdot 10^{-2}$	$6,04 \cdot 10^{-3}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$2,96 \cdot 10^{-2}$
Ковар	673	$5 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
	873	$9,67 \cdot 10^{-2}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$0,292 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$
	1073	0,237	$3,33 \cdot 10^{-2}$	$0,396 \cdot 10^{-2}$	0,200
	1273	0,985	0,152	$0,79 \cdot 10^{-2}$	0,826
	1373	2,81	0,489	0,635	1,687
Молибден	673	$7,1 \cdot 10^{-2}$	—	—	—
	773	$5,411 \cdot 10^{-2}$	$3,42 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
	873	$4,25 \cdot 10^{-2}$	—	$0,164 \cdot 10^{-1}$	$1,86 \cdot 10^{-2}$
	973	$4,91 \cdot 10^{-2}$	$1,14 \cdot 10^{-2}$	—	—
	1073	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$8,77 \cdot 10^{-3}$	$0,85 \cdot 10^{-2}$	$2,92 \cdot 10^{-2}$
	1173	$5,36 \cdot 10^{-2}$	—	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-2}$
	1273	$8,2 \cdot 10^{-2}$	$1,84 \cdot 10^{-2}$	$6,73 \cdot 10^{-3}$	—
	1373	$2,01 \cdot 10^{-1}$	$5,26 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$5,69 \cdot 10^{-2}$
	1473	$2,28 \cdot 10^{-1}$	$2,19 \cdot 10^{-2}$	$2,00 \cdot 10^{-2}$	$1,33 \cdot 10^{-1}$
	1573	$4,41 \cdot 10^{-1}$	$1,51 \cdot 10^{-1}$	$4,47 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-1}$
1673	$2,68 \cdot 10^{-1}$	$8,88 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$2,46 \cdot 10^{-1}$	
1773	$3,05 \cdot 10^{-1}$	$1,57 \cdot 10^{-1}$	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$1,42 \cdot 10^{-1}$	

Металл	Температура, К	Общее количество	Водород	Азот	Окись углерода
Нержавеющая сталь	673	3,7·10 ⁻²	—	—	—
	873	0,235	0,216	3,88·10 ⁻²	1,54·10 ⁻²
	1073	8,56·10 ⁻²	5,5·10 ⁻²	3,94·10 ⁻²	2,67·10 ⁻²
	1273	0,449	0,181	5,13·10 ⁻²	0,263
1373	2,12	0,367	1,96·10 ⁻²	1,74	
Малоуглеродистая сталь	673	8,87·10 ⁻⁴	—	—	—
	773	2,87·10 ⁻²	—	—	—
	873	1,27·10 ⁻²	—	—	—
	973	0,153	2,05·10 ⁻²	7,45·10 ⁻²	5,86·10 ⁻²
	1073	0,178	2,04·10 ⁻²	6,36·10 ⁻²	9,40·10 ⁻²
	1173	0,115	2,98·10 ⁻²	1,34·10 ⁻²	7,2·10 ⁻²
1273	0,216	3,7·10 ⁻²	3,65·10 ⁻²	0,142	
Никель	673	0,214	0,107	8,59·10 ⁻²	9,66·10 ⁻²
	873	0,244	—	—	—
	1073	5,37·10 ⁻²	0,32·10 ⁻²	0,32·10 ⁻²	4,73·10 ⁻²
	1273	0,147	5,16·10 ⁻²	5,37·10 ⁻²	9,05·10 ⁻²
	1473	7,75	—	5,37·10 ⁻²	7,70

Количество и состав газов, выделяющихся из стекла при нагреве, $q_{\text{газ}}$, м³·Па/м²

Марка стекла	Температура обезгаживания, К	Количество выделяющегося газа, м ³ ·Па/м ²	Состав газов, %			
			H ₂ O	CO + N ₂	CO ₂	H ₂ и др.
С49-2	293—723	4·10 ⁻¹	65,6	12,9	16,9	4,6
	293—723	5,33·10 ⁻¹	25	18	56	3
	293—873	5,5·10 ⁻¹	21,5	26,5	42,2	9,5
	293—1083	6,7·10 ⁻¹	20,5	30,5	47	3
	11-1E	293—773	4,65·10 ⁻¹	36	37	22

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Скорости газовыделения фторопласта и композиций на его основе

Материал	Температура, К	Скорость удельного газовыделения q , м ³ ·Па/(м ² ·с)	Температура начала выделение HF, К	Температура резкого повышения газовыделения (температурный барьер), К	Примечание
Фторопласт-4	493	(2,6—4)·10 ⁻⁴	513	593—633	При 548 К выделяется 1,3·10 ⁻¹ м ³ ·Па/(м ² ·с) F и HF
	548	8·10 ⁻⁴	—	—	
ФН-3	До 523	1,3·10 ⁻³	403—453	583—603	Фторопласт-4 с никелем и нитридом бора в качестве наполнителя
	423	1·10 ⁻³	—	—	
ФН-202	423	2,7·10 ⁻⁴	533	533—543	Фторопласт-4 с никелем и MoS ₂
	До 493	4,0·10 ⁻⁴	—	—	
АМИП-15М	До 493	(2,7—4)·10 ⁻⁴	503	523—543	Фторопласт-4 с ситаллом и MoS ₂
	423	6,7·10 ⁻⁴	458	—	
Фторопласт-40	393	4·10 ⁻⁴	433	—	—
	433	8·10 ⁻⁴	—	—	
Фторопласт-3	393	6,7·10 ⁻⁴	—	—	—
	423	8·10 ⁻⁴	—	—	

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Растворимость газов в металлах

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Газ	Металл и его фазовое состояние	Температура, °С	Растворимость при 10 ⁵ Па		Коэффициенты в уравнениях (4-3) и (4-4)			Примечание
			м ³ ·Па/кг	м ³ ·Па/м ³	$s_{p'}$ м ³ ·Па ^{1/2} /кг	$s_{p'}$ м ³ ·Па ^{1/2} /м ³	$E_{p'}$ Дж/к-моль	
Н ₂	α-Fe	573	0,158	1,245·10 ³	0,172	1,353·10 ³	5,58·10 ⁷	
		673	0,376	2,96·10 ³				
		773	0,716	5,64·10 ³				
	γ-Fe	873	1,165	9,18·10 ³				
		973	1,75	1,38·10 ⁴				
		1073	2,40	1,89·10 ⁴				
		1173	3,14	2,48·10 ⁴				
		1179	4,70	3,71·10 ⁴	0,198	1,565·10 ³	5,06·10 ⁷	
		1373	7,00	5,53·10 ⁴				
		1473	8,20	6,47·10 ⁴				
	δ-Fe	1573	10,10	7,96·10 ⁴				
		1673	10,50	8,29·10 ⁴				
		1676	10,1	7,96·10 ⁴	3,25	2,57·10 ⁴	1,293·10 ⁸	
Расплавленное Fe	1808	14,0	1,1·10 ⁵	—	—	—		
	1808	25,0	1,97·10 ⁵	—	—	—		
O ₂	Fe	1073	24,0	1,89·10 ⁵	0,2	1,58·10 ³	1,745·10 ⁷	
		1273	28,0	2,21·10 ⁵				
N ₂	Fe	1023	0,266	2,1·10 ³	4,42·10 ⁷	3,49·10 ¹¹	4,22·10 ⁸	
		1078	1,1	8,66·10 ³				

Продолжение приложения 6

Газ	Металл и его фазовое состояние	Температура, °С	Растворимость при 10 ⁵ Па		Коэффициенты в уравнениях (4-3) и (4-4)			Примечание
			м ³ ·Па/кг	м ³ ·Па/м ³	$s_{p'}$ м ³ ·Па ^{1/2} /кг	$s_{p'}$ м ³ ·Па ^{1/2} /м ³	$E_{p'}$ Дж/к-моль	
N ₂	Fe	1173	4,6	3,63·10 ⁴	4,42·10 ⁷	3,49·10 ¹¹	4,22·10 ⁸	
		1273	9,3	7,34·10 ⁴				
		1343	19,0	1,5·10 ⁵				
		1673	16,6	1,31·10 ⁵				
		1773	1,70	1,51·10 ⁴				
		1873	2,35	2,09·10 ⁴				
H ₂	Ni	673	3,15	2,8·10 ⁴				
		773	4,10	3,65·10 ⁴				
		873	5,25	4,67·10 ⁴				
		973	6,50	5,79·10 ⁴				
		1073	7,75	6,9·10 ⁴				
		1173	9,10	8,1·10 ⁴				
		1273	9,80	8,72·10 ⁴				
		1373	12,15	1,07·10 ⁵				
		1473	14,25	1,27·10 ⁵				
		1573	14,70	1,31·10 ⁵				
		1673	16,20	1,44·10 ⁵				
H ₂	Нержавеющая сталь (18%Cr+8%Ni)	673	3,12	2,5·10 ⁴	5,74·10 ⁻²	459	1,97·10 ⁷	
		873	4,2	—				

Для давлений $p < 2 \cdot 10^2$ Па

Газ	Металл и его фазовое состояние	Температура, К	Растворимость при 10^5 Па		Коэффициенты в уравнениях (4-3) и (4-4)			Примечание
			м ³ ·Па/кг	м ³ ·Па/м ³	с _p ' м ³ ·Па ^{1/2} /кг	с _p ' м ³ ·Па ^{1/2} /м ³	E _p ' Дж/к-моль	
H ₂	Cu	673	0,066	5,91·10 ²	0,181	1,62·10 ³	7,66·10 ⁷	
		773	0,16	1,43·10 ³				
		873	0,30	2,69·10 ³				
		973	0,49	4,39·10 ³				
		1073	0,72	6,45·10 ³				
		1173	1,08	9,67·10 ³				
1273	1,58	1,42·10 ⁴						
1356	2,10	1,88·10 ⁴						
	Расплавленная Cu	1356	6,00	5,38·10 ⁴				
O ₂	Cu	873	5,00	4,48·10 ⁴	0,136	1,22·10 ³	3,36·10 ⁷	
		1073	6,6	5,9·10 ⁴				
		1223	7,0	6,27·10 ⁴				
		1323	10,9	9,76·10 ⁴				
N ₂	Cu	—	—	—	—	—	—	Не растворяется
		693	0,167	1,7·10 ³	2,84·10 ⁻²	2,9·10 ²	5,86·10 ⁷	Значения растворимости при температурах 1036, 1256 и 1368 К получены при эксперименте с порошком Mo, осевшие для проволоки
H ₂	Mo	890	0,189	1,93·10 ³	—	—	—	
		1036	0,255	2,6·10 ³				
		1064	0,244	2,49·10 ³				
		1256	0,322	3,29·10 ³				
		1268	0,566	5,78·10 ³				
		1271	0,488	4,99·10 ³				
1368	0,622	6,85·10 ³						

Газ	Металл и его фазовое состояние	Температура, К	Растворимость при 10^5 Па		Коэффициенты в уравнениях (4-3) и (4-4)			Примечание
			м ³ ·Па/кг	м ³ ·Па/м ³	с _p ' м ³ ·Па ^{1/2} /кг	с _p ' м ³ ·Па ^{1/2} /м ³	E _p ' Дж/к-моль	
N ₂	Mo	1473	0,84	8,56·10 ³	1,925	1,96·10 ⁴	1,613·10 ⁸	Константы растворимости рассчитаны по экспериментальным данным для интервала температур 1473—2673 К
		1873	3,44	3,51·10 ⁴				
		2273	8,4	8,57·10 ⁴				
		2673	16,0	1,63·10 ⁵				
N ₂	W	1473	0,001	19	1,093	2,08·10 ⁴	3,12·10 ⁸	
		1873	0,015	28,6				
		2273	0,088	1,675·10 ²				
		2673	0,304	5,79·10 ²				
H ₂	Al	—	—	—	—	—	—	В твердом состоянии практически не растворяется
		682	0,067	1,44·10 ³	0,603	1,294·10 ⁴	1,444·10 ⁸	Константы растворимости рассчитаны по экспериментальным данным для интервала температур 1306—1615 К
H ₂	Ag	673	0,055	5,78·10 ²	1,65·10 ⁻²	1,73·10 ²	4,99·10 ⁷	
		773	0,110	1,157·10 ³				
		873	0,176	1,85·10 ³				
		973	0,232	2,44·10 ³				
		1073	0,334	3,51·10 ³				
		1173	0,427	4,5·10 ³				

Газ	Металл и его фазовое состояние	Температура, К	Растворимость при 10^6 Па		Коэффициенты в уравнениях (4.3) и (4.4)			Примечание
			м ³ ·Па/кг	м ³ ·Па/м ³	s_p' м ³ ·Па ^{1/2} /кг	s_p' м ³ ·Па ^{1/2} /м ³	E_p' Дж/к·моль	
O ₂	Ag	473	1,300	$1,365 \cdot 10^4$	—	—	Растворимость имеет минимум при 673 К в связи с диссоциацией Ag ₂ O	
		573	0,924	$9,7 \cdot 10^3$	—	—		
		673	0,828	$8,7 \cdot 10^3$	—	—		
		773	0,905	$9,5 \cdot 10^3$	—	—		
		873	1,260	$1,322 \cdot 10^4$	—	—		
		973	1,840	$1,93 \cdot 10^4$	—	—		
1073	3,370	$3,54 \cdot 10^4$	—	—	—			
N ₂	Ag	—	—	—	—	—	Не растворяется	
H ₂	Pd	573	$1,64 \cdot 10^2$	$1,87 \cdot 10^6$	0,151	$1,72 \cdot 10^3$	$9,63 \cdot 10^6$	Расчеты с использованием приведенных значений констант растворимости можно проводить для температур больше 873 К
		673	$1,26 \cdot 10^2$	$1,44 \cdot 10^6$	—	—	—	
		873	92,7	$1,06 \cdot 10^6$	—	—	—	
		1073	84,0	$9,6 \cdot 10^5$	—	—	—	
		1273	78,5	$8,95 \cdot 10^5$	—	—	—	
1473	71,2	$8,12 \cdot 10^5$	—	—	—			

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Растворимость газов в некоторых неметаллических материалах

Газ	Материал	Температура, К	Растворимость при 133 Па		Растворимость при 10^6 Па	
			м ³ ·Па/кг	м ³ ·Па/м ³	м ³ ·Па/кг	м ³ ·Па/м ³
H ₂	Каучук	298	$5 \cdot 10^{-3}$	5,1	~3,9	$\sim 3,9 \cdot 10^3$
		298	$1,8 \cdot 10^{-2}$	13,0	~9,9	$\sim 9,9 \cdot 10^3$
O ₂	"	298	$7 \cdot 10^{-3}$	6,8	~5,2	$\sim 5,2 \cdot 10^3$
		298	$1,2 \cdot 10^{-2}$	12,0	~90	$\sim 9,0 \cdot 10^4$
CO ₂	Перексид кварца	773	$3,8 \cdot 10^{-4}$	1,1	0,3	$8,4 \cdot 10^2$
		573	$3,2 \cdot 10^{-4}$	0,8	0,24	$6,0 \cdot 10^2$
H ₂	Фториды	293—353	—	—	1—1,5	$(2-3) \cdot 10^3$
		293—353	—	—	1,5—2	$(3-4) \cdot 10^3$
H ₂	"	293—353	—	—	1,5—4	$(3-9) \cdot 10^3$
		293—353	—	—	1,5—4,5	$(3-10) \cdot 10^3$

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Количество газов, содержащихся в сталях и сплавах

Материал	Газосодержание							
	Кислород		Азот		Водород			
	м ³ ·Па/кг	м ³ ·Па/м ³	м ³ ·Па/кг	м ³ ·Па/м ³	м ³ ·Па/кг	м ³ ·Па/м ³		
Сталь 12X18H10T	2,25	$17,5 \cdot 10^3$	5,1	$40,3 \cdot 10^3$	$6,5-11,0$	$(51,4-87) \times 10^3$	13—18	$10,3 \cdot 10^4$ $-14,3 \cdot 10^4$
Сплав X20H80	—	—	—	—	14,0	$11,7 \cdot 10^4$	—	—
Сталь 10	9,0	$71 \cdot 10^3$	3,5	$27,6 \cdot 10^3$	2,15	$17 \cdot 10^3$	14,65	$11,5 \cdot 10^4$
Сталь 20	2,25	$17,6 \cdot 10^3$	3,44	$29 \cdot 10^3$	2,15	$16,9 \cdot 10^3$	8,1	$63,5 \cdot 10^3$

Газосодержание

Материал	Кислород		Азот		Водород		Всего газов	
	мг. Па/кг	м ³ . Па/м ³	мг. Па/кг	м ³ . Па/м ³	мг. Па/кг	м ³ . Па/м ³	мг. Па/кг	м ³ . Па/м ³
	Электролитическое желе- зо	7,5	58,9·10 ³	3,18	25·10 ³	12,0	94·10 ³	22,68
Сталь У7	—	—	—	—	—	—	3,2—4,3	(25,2—33,8)× 10 ³
Сталь ШХ15	4,1	32·10 ³	—	—	—	—	—	—
Сталь ШХ15 после элек- тродугового переплава	1,5	11,7·10 ³	—	—	—	—	—	—
Сталь 30ХГСА	3,0	23,5·10 ³	3,43	27·10 ³	1,3	10,2·10 ³	7,73	60,6·10 ³
Сталь электротехническая	12,9	1·10 ⁵	—	—	0,0003	2,32	12,9	1·10 ⁵
тонколистовая	1,65	12,7·10 ³	—	—	0,00005	0,385	1,65	12,7·10 ³
Сталь электротехническая								
тонколистовая после ва- куумной плавки								

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Коэффициенты диффузии газов в металлах и сплавах

Газ	Металл	Температура, К	Коэффициент диффузии D , м ² /с	Коэффициенты в уравнении (4-5)	
				D_0 , м ² /с	E_D , Дж/кмоль
H ₂	Fe	1023	2,1·10 ⁻⁸	1,1·10 ⁻⁶	8,35·10 ⁷
O ₂	Fe	1273	7,5·10 ⁻¹⁴	3,92·10 ⁻¹²	8,38·10 ⁷
		1373	1,0·10 ⁻¹³		

Продолжение приложения 9

Газ	Металл	Температура, К	Коэффициент диффузии D , м ² /с	Коэффициенты в уравнении (4-5)	
				D_0 , м ² /с	E_D , Дж/кмоль
CO	Fe	—	—	1,3·10 ⁻⁵	1,637·10 ⁸
C	Fe	1173	3,8·10 ⁻¹²	4,26·10 ⁻³	4,06·10 ⁸
		1223	8,7·10 ⁻¹²		
		1273	2,0·10 ⁻¹¹		
N ₂	Fe	1073	1,2·10 ⁻¹²	1,07·10 ⁻⁵	2,85·10 ⁸
		1123	3,0·10 ⁻¹²		
		1173	6,0·10 ⁻¹²		
		1223	1,08·10 ⁻¹¹		
		1273	1,35·10 ⁻¹¹		
		1323	2,5·10 ⁻¹¹		
	1373	4,0·10 ⁻¹¹			
H ₂	Нержавеющая сталь	1023	3,4·10 ⁻¹⁰	1,1·10 ⁻⁷	4,94·10 ⁷
N ₂	Нержавеющая сталь	—	—	1·10 ⁻⁵	5,66·10 ⁸
CO	Нержавеющая сталь	—	—	5·10 ⁻⁵	5,74·10 ⁸
H ₂	Ni	388	8,6·10 ⁻¹³	2,04·10 ⁻⁷	7,3·10 ⁷
		398	3,4·10 ⁻¹²		
		438	1,05·10 ⁻¹¹		
		498	6,41·10 ⁻¹¹		
		553	1,19·10 ⁻¹⁰		

Продолжение приложения

Газ	Металл	Температура, К	Коэффициент диффузии D , м ² /с	Коэффициенты в уравнении (4-5)	
				D_0 , м ² /с	E_D , Дж/кмоль
O ₂	Ni	1173	1,5·10 ⁻¹⁴	1,89·10 ⁻⁹	6,78·10 ⁸
		1223	6,8·10 ⁻¹⁴		
		1273	2,36·10 ⁻¹³		
CO	Ni	1323	7,8·10 ⁻¹³	5,4·10 ⁻⁷	1,98·10 ⁸
		298	2·10 ⁻²⁴		
		973	2,5·10 ⁻¹²		
C	Ni	1223	4·10 ⁻¹²	6,0·10 ⁻⁵	3,35·10 ⁸
		1323	1,4·10 ⁻¹¹		
		—	—		
H ₂	Cu	—	—	1,2·10 ⁻⁵	2,75·10 ⁸
		—	—		
H ₂	Mo	—	—	1,1·10 ⁻⁶	1,53·10 ⁸
		—	—		
H ₂	Сплав АМЦ	723	2,1·10 ⁻¹⁰	7,25·10 ⁻⁸	1,74·10 ⁸
		—	—		
H ₂	W	550	10 ⁻¹²	1,4·10 ⁻⁷	3,93·10 ⁷
		600	10 ⁻¹¹		
H ₂	Pd	350	10 ⁻¹⁰	0,1	2,3·10 ⁸
		600	10 ⁻⁸		
H ₂	Pd	350	10 ⁻¹⁰	6,61·10 ⁻⁵	6,46·10 ⁷
		600	10 ⁻⁸		

Продолжение приложения 9

Газ	Металл	Температура, К	Коэффициент диффузии D , м ² /с	Коэффициенты в уравнении (4-5)	
				D_0 , м ² /с	E_D , Дж/кмоль
O ₂	Ti	1500	5,65·10 ⁻¹²	4,7·10 ⁻⁸	2,18·10 ⁸
		2000	6,8·10 ⁻¹¹		
O ₂	Cu	900	10 ⁻¹²	7,76·10 ⁻⁶	2,38·10 ⁸
		1270	10 ⁻¹⁰		
H ₂	SiO ₂	500	10 ⁻¹³	5,5·10 ⁻¹⁰	3,64·10 ⁷
		600	3,8·10 ⁻¹³		
He	Пирекс	300	8,1·10 ⁻¹³	2,58·10 ⁻⁸	2,59·10 ⁷
		600	1,45·10 ⁻¹⁰		
He	Плавленый кварц	300	—	3·10 ⁻⁸	2,34·10 ⁷
		500	—		
He	Плавленый кварц	600	—	7·10 ⁻⁸	2,77·10 ⁷
		1300	—		

Проницаемость материалов

Газ	Материал	Температура, °K	Проницаемость $q', \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Коэффициенты в уравнении (4-16)		Коэффициенты в уравнении (4-17)		Примечания
				$q_{\text{пр}}, \text{ м}^3 \times$ $\times \text{Па} (1 - 1 / f) / \text{м} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$E_{\text{пр}},$ Дж/к-моль	$C_{\text{пр}}$	$B_{\text{пр}}$	
H ₂	Fe	298	$4 \cdot 10^{-6} - 1 \times 10^{-11}$	$1,549 \cdot 10^{-4}$				Давление равно 10^4 Па, при давлении $2 \cdot 10^2$ Па и меньше необходимо учитывать коэффициент заполнения поверхности (см. § 3-2)
		323	$5 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-9}$					
N ₂	Fe	1095	$2,22 \cdot 10^{-6}$	$4,27 \cdot 10^{-4}$				Давление равно 10^5 Па То же
		1387	$2,22 \cdot 10^{-5}$					
CO	Fe	965	$2,22 \cdot 10^{-6}$	$1,235 \cdot 10^{-4}$	$1,559 \cdot 10^8$		$-1,4087$	То же " "
		1266	$2,22 \cdot 10^{-5}$					
H ₂	Ni	681	$2,22 \cdot 10^{-6}$	$1,368 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^8$		$-0,3642$	То же " "
		889	$2,22 \cdot 10^{-5}$					

Продолжение приложения 10

Газ	Материал	Температура, °K	Проницаемость $q', \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Коэффициенты в уравнении (4-16)		Коэффициенты в уравнении (4-17)		Примечания
				$q_{\text{пр}}, \text{ м}^3 \times$ $\times \text{Па} (1 - 1 / f) / \text{м} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$E_{\text{пр}},$ Дж/к-моль	$C_{\text{пр}}$	$B_{\text{пр}}$	
H ₂	Pd	298	$(5-8) \cdot 10^{-6}$	$4,59 \cdot 10^{-2}$	$8,87 \cdot 10^7$	$1,161$	$2,318 \cdot 10^3$	При температуре свыше 400 К и выше и давлениях ниже 10^5 Па и меньше не- обходимо учитывать коэффициент заполне- ния поверхности Давление равно 10^5 Па
		323	$(5-8) \cdot 10^{-5}$					
H ₂	Нержавеющая сталь	298	$7 \cdot 10^{-11} - 7 \times 10^{-14}$	$8,85 \cdot 10^{-4}$				Давление равно 10^5 Па То же
		323	$2,10 \cdot 10^{-5} - 5 \times 10^{-12}$					
H ₂	Mo	298	$1 \cdot 10^{-14}$	$7,89 \cdot 10^{-3}$	$3,765 \cdot 10^8$	$0,3965$	$9,837 \cdot 10^8$	То же " "
		323	$2 \cdot 10^{-12}$					
N ₂	Mo	871	$2,22 \cdot 10^{-6}$					То же " "
		1086	$2,22 \cdot 10^{-5}$					
N ₂	Mo	1635	$2,22 \cdot 10^{-6}$					То же " "
		1860	$2,22 \cdot 10^{-5}$					

Газ	Материал	Температура, К	Проницаемость $q', \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Коэффициенты в уравнении (4.16)		Коэффициенты в уравнении (4.17)		Примечания
				$q_{пр}, \text{ м}^3 \times$ $\times \text{Па} (1 - 1/P_{\text{м}}) / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$E_{пр}',$ Дж/к-моль	$C_{пр}$	$B_{пр}$	
H ₂	Cu	298	$5 \cdot 10^{-15}$ — $1 \cdot 10^{-16}$	$2,189 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^8$	—1,1209	$3,629 \cdot 10^3$	При температурах свыше 600 К надо учитывать коэффици- ент заполнения по- верхности. Давление равно 10^5 Па То же
		323	$2 \cdot 10^{-14}$ — $4 \cdot 10^{-15}$					
O ₂	Ag	814 1048	$2,22 \cdot 10^{-6}$ $2,22 \cdot 10^{-5}$	$1,958 \cdot 10^{-3}$	$1,89 \cdot 10^8$	—0,209	$4,941 \cdot 10^3$	Давление 10^5 Па То же
		913 1119	$2,22 \cdot 10^{-6}$ $2,22 \cdot 10^{-5}$					
H ₂	Pt	298	$\leq 1 \cdot 10^{-13}$	$7,74 \cdot 10^{-3}$	$1,619 \cdot 10^8$	0,388	$4,22 \cdot 10^3$	Давление 10^5 Па То же
		702	$2,22 \cdot 10^{-6}$					
H ₂	Al	844	$2,22 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$2,58 \cdot 10^8$	1,101	$6,735 \cdot 10^3$	Давление 10^5 Па То же
		298	$\leq 1 \cdot 10^{-13}$					
H ₂		773	$2,295 \cdot 10^{-6}$					
		873	$2,265 \cdot 10^{-7}$					

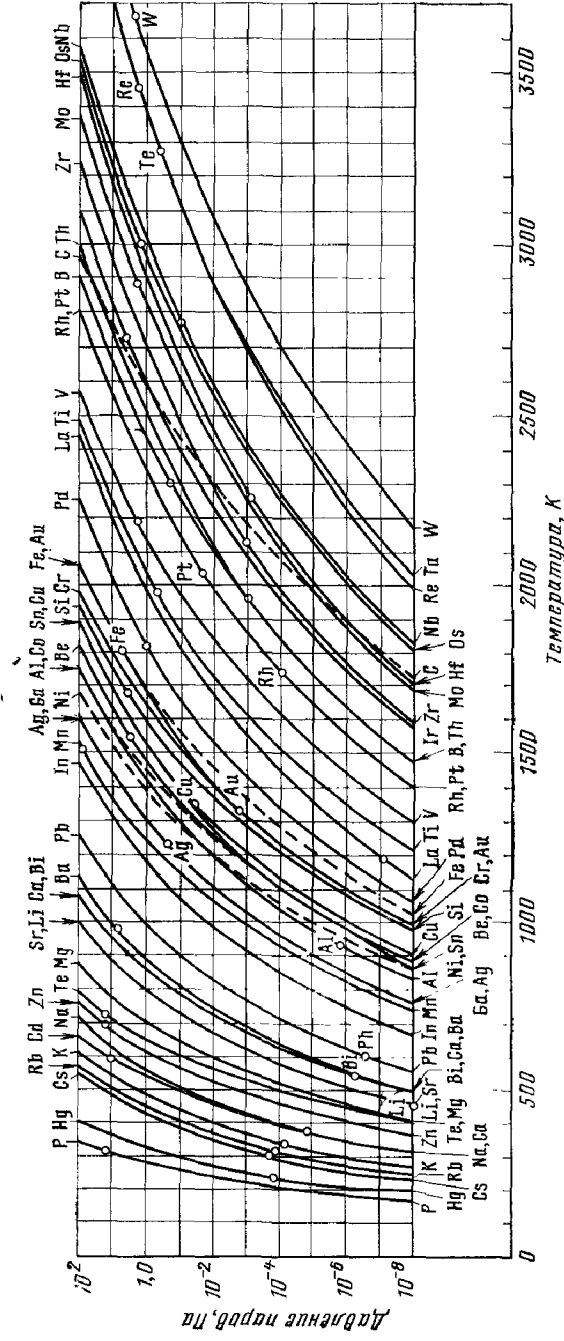
Газ	Материал	Температура, К	Проницаемость $q', \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Коэффициенты в уравнении (4.16)		Коэффициенты в уравнении (4.17)		Примечания
				$q_{пр}, \text{ м}^3 \times$ $\times \text{Па} (1 - 1/P_{\text{м}}) / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$E_{пр}',$ Дж/к-моль	$C_{пр}$	$B_{пр}$	
He	Стекло С33-1	473	10^{-9}	$1,95 \cdot 10^{-10}$	$2,23 \cdot 10^7$	—4,71	$1,165 \cdot 10^3$	Давление 10^5 Па То же
		673	$5,9 \cdot 10^{-9}$					
He	Стекло С40-1	473	$1,172 \cdot 10^{-10}$	$2,114 \cdot 10^{-10}$	$3,0 \cdot 10^7$	—4,675	$1,57 \cdot 10^3$	То же
		673	$1,181 \cdot 10^{-9}$					
He	Стекло С48-1	373	$1,14 \cdot 10^{-11}$	$1,843 \cdot 10^{-10}$	$3,08 \cdot 10^7$	—4,735	$1,611 \cdot 10^3$	То же
		673	$1,39 \cdot 10^{-9}$					
He	Стекло С49-2	373	$7,6 \cdot 10^{-12}$	$2,43 \cdot 10^{-10}$	$3,24 \cdot 10^7$	—4,615	$1,695 \cdot 10^3$	То же
		673	$1 \cdot 10^{-9}$					
He	Стекло С47-1	373	$6,05 \cdot 10^{-12}$	$1,38 \cdot 10^{-10}$	$3,1 \cdot 10^7$	—4,985	$1,62 \cdot 10^3$	То же
		673	$7,25 \cdot 10^{-10}$					
He	Стекло С87-1	473	$3,1 \cdot 10^{-12}$	$1,305 \cdot 10^{-10}$	$4,2 \cdot 10^7$	—4,885	$2,2 \cdot 10^3$	Давление 10^5 Па То же
		623	$8,5 \cdot 10^{-11}$					
He	Стекло С88-1	423	$6,4 \cdot 10^{-13}$	$3,74 \cdot 10^{-10}$	$4,77 \cdot 10^7$	—4,425	$2,5 \cdot 10^3$	То же
		673	$1 \cdot 10^{-10}$					
He	Стекло С89-1	423	$4,0 \cdot 10^{-13}$	$1,275 \cdot 10^{-10}$	$4,57 \cdot 10^7$	—4,895	$2,39 \cdot 10^3$	То же
		673	$8,0 \cdot 10^{-11}$					

Газ	Материал	Температура, °С	Проницаемость $q', \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Коэффициенты в уравнении (4-16)		Коэффициенты в уравнении (4-17)		Примечания
				$q_{\text{пр}} \cdot \text{м}^3 \times$ $\times \text{Па} (1 - l/l_m) (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$E_{\text{пр}}'$ Дж/к-моль	$C_{\text{пр}}$	$B_{\text{пр}}$	
He	Стекло С89-2	423	$2,7 \cdot 10^{-13}$	$1,19 \cdot 10^{-16}$	$4,73 \cdot 10^7$	-4,925	$2,47 \cdot 10^3$	Давление 10^5 Па То же
		623	$2,0 \cdot 10^{-11}$			-1,825	$4,01 \cdot 10^3$	То же " "
He	Стекло С90-1	423	$7,1 \cdot 10^{-14}$	$1,19 \cdot 10^{-7}$	$7,68 \cdot 10^7$			То же " "
		623	$2,0 \cdot 10^{-11}$					То же " "
He	Стекло С48-3	523	$2,3 \cdot 10^{-13}$	$1,275 \cdot 10^{-10}$	$5,86 \cdot 10^7$		$3,06 \cdot 10^3$	То же " "
		723	$1,10^{-11}$					То же " "
He	Стекло С39-2	573	$5,3 \cdot 10^{-13}$	$6,8 \cdot 10^{-9}$	$7,97 \cdot 10^7$		$4,16 \cdot 10^3$	То же " "
		723	$1,8 \cdot 10^{-11}$					То же " "
He	Кварц	423	$7,82 \cdot 10^{-10}$	$2,99 \cdot 10^{-10}$	$2,27 \cdot 10^7$		$1,186 \cdot 10^3$	То же " " " " " " " " " " " " " " " " " "
		473	$1,49 \cdot 10^{-9}$					
		573	$3,38 \cdot 10^{-8}$					
		673	$6,6 \cdot 10^{-9}$					
		773	$1,11 \cdot 10^{-8}$					
		873	$1,76 \cdot 10^{-8}$					
		973	$2,35 \cdot 10^{-8}$					
		1073	$3,06 \cdot 10^{-8}$					
		1173	$3,88 \cdot 10^{-8}$					
		1273	$4,86 \cdot 10^{-8}$					

Газ	Материал	Температура, °С	Проницаемость $q', \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Коэффициенты в уравнении (4-16)		Коэффициенты в уравнении (4-17)		Примечания
				$q_{\text{пр}} \cdot \text{м}^3 \times$ $\times \text{Па} (1 - l/l_m) (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$E_{\text{пр}}'$ Дж/к-моль	$C_{\text{пр}}$	$B_{\text{пр}}$	
H ₂	Кварц	298	$2 \cdot 10^{-12} - 8 \times 10^{-13}$					Давление 10^5 Па То же
		323	$2 \cdot 10^{-11} - 5 \times 10^{-12}$					Давление $1,33 \cdot 10^5 \text{ Па}$ То же
		873	$1,34 \cdot 10^{-9}$	$2,105 \cdot 10^{-10}$	$3,61 \cdot 10^7$	-4,677	$1,888 \cdot 10^3$	
		973	$2,25 \cdot 10^{-9}$	$9,9 \cdot 10^{-9}$	$9,24 \cdot 10^7$	-3,004	$4,82 \cdot 10^3$	
O ₂	Кварц	973	$< 10^{-15}$					То же " "
		1173	$9,0 \cdot 10^{-13}$					То же " "
Ar	Кварц	1173	$5,8 \cdot 10^{-10}$					То же " "
		873	$3,0 \cdot 10^{-10}$	$5,89 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^7$	-5,230	$2,094 \cdot 10^3$	То же " "
Ne	Кварц	973	$4,5 \cdot 10^{-10}$					То же " "
		1173	$1,27 \cdot 10^{-9}$					То же " "
Воз- дух	Керамика	1713	$4,2 \cdot 10^{-13}$	$1,535 \cdot 10^{-8}$	$1,49 \cdot 10^8$	-2,814	$7,8 \cdot 10^3$	Давление I па равно
He	Резина натураль- ная			$1,45 \cdot 10^{-6}$	$2,72 \cdot 10^7$	-0,839	$3,27 \cdot 10^3$	То же
				$5,0 \cdot 10^{-6}$	$3,89 \cdot 10^7$	-0,699	$4,685 \cdot 10^3$	" "
				$8,86 \cdot 10^{-6}$	$3,14 \cdot 10^7$	-0,052	$3,78 \cdot 10^3$	" "
				$4,82 \cdot 10^{-6}$	$2,886 \cdot 10^7$	-0,317	$3,48 \cdot 10^3$	" "

Газ	Материал	Температура, °K	Проницаемость $q', \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Коэффициенты в уравнении (4-16)		Коэффициенты в уравнении (4-17)		Примечания
				$q_{\text{пр}}, \text{ м}^3 \times$ $\times \text{Па} (1 - 1/j) / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$E_{\text{пр}}, \text{ Дж} / \text{к} \cdot \text{моль}$	$C_{\text{пр}}$	$B_{\text{пр}}$	
N_2	Резина 7889	298	$1 \cdot 10^{-9}$	$2,87 \cdot 10^{-7}$	$2,59 \cdot 10^7$	-1,542	$3,12 \cdot 10^2$	Давление равно $1,33 \cdot 10^2 \text{ Па}$
N_2	Резина 9024	298	$1 \cdot 10^{-10}$	$8,05 \cdot 10^{-4}$	$5,14 \cdot 10^7$	1,906	$6,2 \cdot 10^3$	То же
N_2	Резина ИРП-1015	298	$5 \cdot 10^{-11}$	$2,12 \cdot 10^{-4}$	$4,97 \cdot 10^7$	1,326	$6,0 \cdot 10^3$	" "
N_2	Резина ИРП-1368	298	$3 \cdot 10^{-8}$	$8,7 \cdot 10^{-9}$	$8,78 \cdot 10^6$	-3,06	$1,06 \cdot 10^3$	" "
N_2	Резина ИРП-2043	298	$5 \cdot 10^{-11}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$	$4,21 \cdot 10^7$	0,068	$5,1 \cdot 10^3$	" "
N_2	Фторопласт-4	293	$1,05 \cdot 10^{-9}$					Давление равно 10^5 Па
		323	$1,0 \cdot 10^{-8}$					
He	Фторопласт-4	293	$3,2 \cdot 10^{-9}$					Давление равно $1,33 \cdot 10^2 \text{ Па}$
N_2	Фторопласт-4	293	$1,1 \cdot 10^{-10}$					То же
O_2	Фторопласт-4	293	$2,5 \cdot 10^{-10}$					" "
N_2	Резина нитрильная	298	$1,7 \cdot 10^{-6} - 5 \times$ $(1,8 - 5,4) \cdot 10^{-6}$					Давление равно 10^5 Па
		323	$\times 10^{-7}$					То же
N_2	Полиэтилен высокой плотности	298	$2,1 \cdot 10^{-7}$					То же
		323	$9,0 \cdot 10^{-7}$					" "
N_2	Полиамид	298	$7,3 \cdot 10^{-8}$					Давление равно 10^5 Па
		323	$2,3 \cdot 10^{-7}$					То же
N_2	Полиэтилен-тетрафталатная пленка	298	$4,4 \cdot 10^{-8}$					То же
		323	$9,4 \cdot 10^{-8}$					" "

ПРИЛОЖЕНИЕ 11



Чувствительность вакуумметрических преобразователей косвенного действия по разным газам относительно азота

Преобразователь	Газы											
	Воздух	N ₂	H ₂	He	Ne	Ar	Kr	Xe	O ₂	CO	CO ₂	CH ₄
ПМИ-2	1,0	1,00	0,43	0,16	0,27	1,29	—	2,82	0,85	1,02	—	1,52
ПМТ-2	1,0	1,00	0,67	1,12	1,31	1,56	2,3	—	—	0,97	0,94	0,61
ПММ-14М	1,0	1,00	0,46	0,15	0,25	1,6	2,6	3,4	1,1	—	1,30	—
ПМИ-27	1,0	1,00	0,49	0,29	0,41	1,6	2,0	3,0	1,1	—	1,6	—
МИ-12-8	1,0	1,00	0,45	0,24	0,34	1,6	2,2	3,1	1,01	—	1,6	—

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- A — площадь поверхности, поперечного сечения;
- a — скорость звука;
- C — постоянная Сезерленда;
- C_p — молярная теплоемкость газа при постоянном давлении;
- C_v — молярная теплоемкость газа при постоянном объеме;
- $C_{уд}$ — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме (теплоемкость при постоянном объеме единицы массы газа);
- $C_{руд}$ — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении (теплоемкость при постоянном давлении единицы массы газа);
- c_1, c_2 — объемные концентрации газа;
- c_0 — начальная концентрация газа;
- D — коэффициент диффузии;
- d — диаметр трубопровода;
- $d_{гидр}, R_{гидр}$ — гидравлический (эквивалентный) диаметр и радиус трубопровода;
- E — внутренняя энергия газа;
- $E_{дес}$ — энергия десорбции;
- $E_{ад}$ — энергия адсорбции;
- $E_{кон}$ — энергия конденсации;
- E_p — энергия активации растворимости;
- E_d — энергия активации диффузии;
- $E_{пр}$ — энергия активации проницаемости;
- e — заряд электрона;
- F — сила трения;
- ΔF^0 — стандартная свободная энергия;
- G_u — удельный поток массы испаряющегося материала;
- g — ускорение силы тяжести;
- H — напряженность магнитного поля;
- h — ход сильфона в осевом направлении;
- $h_{раст}$ — рабочий ход сильфона при растяжении;
- $h_{сж}$ — рабочий ход сильфона при сжатии;
- $h_{наиб}$ — наибольший ход мембраны;
- j — число атомов в молекуле газа;
- I — сила тока;
- $K_{мемб}$ — коэффициент неравномерности, зависящий от хода мембраны;
- k — постоянная Больцмана;
- l — длина трубопровода;
- M — молекулярная масса газа (а. е. м.);
- M' — массовый поток газа в единицах массы;
- $M'_{кр}$ — критический массовый поток газа;
- M_u — масса газа, кг;
- M'_u — массовый поток пара, кг;
- m — масса молекулы;
- $m_{1,2}$ — приведенная масса молекул смеси газов;
- N — число молекул;
- N_1 — число молекул в единице объема;
- $N_{пов}$ — количество мест на единичной поверхности, которые могут быть заняты адсорбированными молекулами;

$N_{\text{пов}}$ — количество молекул, адсорбированных на единице поверхности;
 N_u — число молекул, попадающих на единицу поверхности в единицу времени;
 N_A — число Авогадро;
 N_L — число Лошмидта;
 n — показатель политропы;
 n_m — число молей газа;
 p — давление газа;
 $p_{\text{в}}$ — давление газа во входном сечении насоса;
 $p_{\text{нач}}$ — начальное давление в сосуде; наибольшее давление запуска, при котором насос может начать работу;
 $p_{\text{нас}}$ — давление насыщенных паров;
 $p_{\text{наиб}}$ — наибольшее давление в выпускном сечении насоса, при котором он еще может осуществлять откачку;
 $p_{\text{ост}}$ — предельное остаточное давление, т. е. минимальное давление, которое может быть достигнуто в определенных условиях данным насосом;
 $p_{\text{вып}}$ — выпускное давление насоса;
 $p_{\text{изм}}$ — отсчет давления вакуумметром;
 p_m — давление газа в объеме манометрического преобразователя;
 p_b — атмосферное давление (барометрическое);
 Q — количество газа в pV -единицах;
 Q_1 — количество газа, адсорбированного на единичной поверхности при ее полном заполнении;
 Q' — поток газа;
 Q'_t — тепловой поток;
 $Q'_{\text{об}}$ — объемный расход газа;
 $q_{\text{газ}}$ — удельное газовыделение из единицы массы обрабатываемого материала;
 $q'_{\text{ад}}$ — удельный поток газа, адсорбирующегося на единичной поверхности;
 $q'_{\text{дес}}$ — удельный поток газа, десорбирующегося с единичной поверхности;
 $q_{\text{пр}}$ — константа проницаемости;
 q' — удельный поток газа или скорость удельного газовыделения;
 R_0 — универсальная газовая постоянная;
 Re — число Рейнольдса;
 S — быстрота откачки;
 S_n — быстрота действия насоса;
 S_0 — эффективная быстрота откачки;
 S_m — быстрота откачивающего действия манометрического преобразователя;
 s — растворимость;
 s_m — чувствительность манометрического преобразователя, масс-спектрометра;
 T — абсолютная температура;
 t — время;
 t_s — время пребывания молекулы на поверхности твердого тела в адсорбированном состоянии;
 U — проводимость;
 U_v — проводимость при вязкостном режиме течения газа;
 U_T — проводимость при турбулентном режиме течения газа;

U_m — проводимость при молекулярном режиме течений газа;
 $U_{m,v}$ — проводимость при молекулярно-вязкостном режиме течения газа;
 $U_{\text{уск}}$ — ускоряющее напряжение;
 u — скорость теплового движения молекул;
 \bar{u} — средняя квадратичная скорость;
 u_a — средняя арифметическая скорость;
 u_v — наиболее вероятная скорость;
 $u_{\text{газ}}$ — скорость течения потока газа;
 $u_{\text{ср}}$ — средняя скорость потока;
 $u_{\text{и}}$ — скорость ионов;
 V — объем сосуда;
 $V_{\text{уд}}$ — удельный объем;
 V_0 — объем грамм-молекулы газа;
 V_1 — объем газа, ударяющегося о поверхность площадью 1 м^2 за 1 с ;
 W — сопротивление течению газа;
 Z — число межмолекулярных столкновений в единице объема за единицу времени;
 Z_1 — число столкновений, испытываемое одной молекулой в единицу времени;
 α — коэффициент прилипания;
 $\alpha_{\text{ак}}$ — коэффициент аккомодации;
 α_r — относительная чувствительность манометрического преобразователя;
 β — коэффициент, учитывающий энергию колебательного и вращательного движений молекулы;
 $\beta_{\text{лов}}$ — защитная способность ловушки;
 β_r — относительная концентрация;
 δ — толщина мембраны;
 ϵ — коэффициент температурного скачка;
 $\epsilon_{\text{ск}}$ — коэффициент сжатия;
 ζ — коэффициент сопротивления;
 η — коэффициент вязкости;
 θ — коэффициент заполнения поверхности молекулами адсорбированного газа;
 κ — отношение удельных теплоемкостей $C_{p,уд}/C_{v,уд}$;
 λ — средняя длина свободного пути молекулы;
 $\lambda_{1,2}$ — средняя длина свободного пути молекул для смеси двух газов;
 λ_T — средняя длина свободного пути молекулы при температуре T ;
 λ_{∞} — средняя длина свободного пути молекулы при бесконечно большой температуре;
 λ_1 — средняя длина свободного пути при давлении 1 Па ;
 λ_0 — коэффициент теплопроводности;
 μ — число молекул, десорбирующихся в единицу времени с единицы поверхности;
 μ_1 — число молекул, десорбирующихся при полностью открытой молекулами газа поверхности;
 $\mu_{\text{П}}$ — коэффициент Пуассона;
 ν — коэффициент использования насоса;
 $\xi_{\text{мемб}}$ — коэффициент эффективности мембраны при нулевом прогибе;

- ρ — плотность газа;
 ρ_1 — плотность газа при давлении 1 Па;
 Σ — вероятность прохождения молекулы через отверстие, канал;
 σ — диаметр молекулы;
 $\sigma_{1,2}$ — диаметр молекул для смеси двух газов;
 σ_∞ — диаметр молекулы при бесконечно большой температуре;
 σ_h — напряжение в материале сальфона;
 σ_φ — напряжение поперечной деформации;
 τ_0 — коэффициент, связанный с периодом колебаний атома;
 τ_b — постоянная времени;
 τ — касательное напряжение в материале мембраны;
 $\tau_{доп}$ — допустимое напряжение на срез;
 $\Phi_{тр}$ — коэффициент, учитывающий потери напора газа в результате трения;
 Φ_r — относительная проводимость трубопровода;
 Ω — коэффициент неравномерности процесса газовой выделения во времени;
 ω — частота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверина А. П., Линник Л. Н., Никитина Г. Н. Масс-спектрометры для измерения парциальных давлений в вакуумных системах. — Приборы и техника эксперимента, 1965, № 4, с. 5.
2. Балицкий А. В. Технология изготовления вакуумной аппаратуры. М.: Энергия, 1974. — 312 с.
3. Беррер Р. Диффузия в твердых телах. М.: Изд-во иностр. лит., 1948. — 504 с.
4. Биршерт А. А. Инерционность теплоэлектрических манометрических преобразователей. — Приборы и техника эксперимента, 1965, № 5, с. 183.
5. А. с. № 395916 (СССР). Реле вакуумное биметаллическое./ Биршерт А. А., Муравьев Г. С.
6. Болтакс Б. И. Диффузия в полупроводниках. М.: Госуд. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1961. — 462 с.
7. Бранауэр С. Адсорбция газов и паров. М.: Изд-во иностр. лит., 1948. — 784 с.
8. Васильев Г. А. Магниторазрядные насосы. М.: Энергия, 1970. — 112 с.
9. Волчкович А. И. Высоковакуумные адсорбционные насосы. М.: Машиностроение, 1973. — 158 с.
10. Глазков А. А., Малышев И. Ф., Саксаганский Г. Л. Вакуумные системы электрофизических установок. М.: Атомиздат, 1975. — 192 с.
11. Гейнце В. Введение в вакуумную технику. М.: Госэнергоиздат, 1960. — 517 с.

12. Насосы криосорбционные заливные гелиевые/ Грибов А. С., Кошеров В. В., Мартинсон Е. Н. и др. — Электронная промышленность, 1973, № 9, с. 97—98.
13. А. С. № 199453 (СССР). Магниторазрядный вакуумметр/ Григорьев А. М.
14. А. С. № 502223 (СССР). Способ непрерывного измерения потока разрезанного газа/ Григорьев А. М., Пенчко Е. А., Фурсов А. И. и др.
15. А. С. № 382931 (СССР). Способ определения величины газового потока при низких давлениях/ Григорьев А. М., Пенчко Е. А., Фальковский Л. А. и др.
16. Вакуумное оборудование и вакуумная техника/ Под ред. А. Гутри и Р. Уокерлинга. — М.: Изд-во иностр. лит., 1951. — 280 с.
17. Грошковский Я. Техника высокого вакуума. М.: Мир, 1975. — 622 с.
18. Данилов К. Д. Сверхвысоковакуумный ввод поступательного движения. — Электронная техника. Сер. 1, 1973, вып. 4, с. 112.
19. Сверхвысоковакуумный прогреваемый ввод вращения/ Данилов К. Д., Ермаков Н. Н., Анохин И. Д. и др. — Электронная техника. Сер. 7, 1973, вып. 1 (53), с. 112.
20. Данилин Б. С., Минайчев В. Е. Основы конструирования вакуумных систем. М.: Энергия, 1971. — 392 с.
21. Высокоэкономичные паромасляные диффузионные насосы/ Данилин Б. С., Минайчев В. Е., Пискарев А. Ф. и др. — Электронная техника. Сер. 7, вып. 3 (55), 1973, с. 84—90.
22. Де-Бур Я. Динамический характер адсорбции. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. — 290 с.
23. Джейрам Р. Масс-спектрометрия. Теория и приложения. М.: Мир, 1969. — 252 с.
24. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. М.: Мир, 1964. — 715 с.
25. Капралова Н. А., Назаров А. С. Фильтр для защиты откачиваемого объема от паров масла механических насосов. — Электронная промышленность, 1974, № 4, с. 91—92.
26. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. — 244 с.
27. Электродуговой сорбционный высоковакуумный агрегат ВЭД-1/ Киричек И. Р., Мартыненко В. Г., Гришин С. Ф. и др. — В сб.: Вопросы атом. науки и тех. сер. Физ. и техника высок. вакуума. Харьков, 1973, вып. 1 (1), с. 16—18.
28. Коваленко В. Ф. Скорость испарения и давление пара химических элементов. — Электронная техника. Сер. 1, 1969, вып. 10, с. 119—145.
29. Коль В. Технология материалов для электровакуумных приборов. М.: Госэнергоиздат, 1957. — 448 с.
30. А. с. № 304468 (СССР). Теплоэлектрический вакуумметр/ Комаров Н. Ф., Пенчко Е. А.
31. А. с. № 334403 (СССР). Вакуумный насос/ Кондрашев В. С., Пак К. С.
32. Основы вакуумной техники/ [Королев Б. И., Кузнецов В. И., Пилко А. И., Шлыкковский В. Я.]. — М.: Энергия, 1975. — 416 с.
33. Королева Т. В., Пенчко Е. А. Влияние ионных токов десорбции на показания номинационных манометров при сверхнизких давлениях. — Приборы и техника эксперимента, 1971, № 2, с. 265.

34. **Кремлевский П. П.** Расходомеры и счетчики количества. М.: Машиностроение, 1975. — 776 с.
35. **Кузнецов В. И.** Механические вакуумные насосы. М.: Госэнергоиздат, 1959. — 279 с.
36. **Кутателадзе С. С.** Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, 1970. — 658 с.
37. **Левин Г.** Основы вакуумной техники. М.: Энергия, 1969. — 272 с.
38. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. — 848 с.
39. **Любимов М. Л.** Спаи металла со стеклом. М.: Энергия, 1968. — 280 с.
40. **Малев М. Д.** Выделение газа из металлов в высоком вакууме. — ЖТФ, 1972, 42, № 12, с. 2589—2595.
41. **Медников М. И.** Вводы движения в вакуум. М.: Машиностроение, 1974. — 184 с.
42. **Минайчев В. Е., Зыков В. М.** Криоконденсационный бустерный насос. — Приборы и техника эксперимента, 1973, № 3, с. 148—151.
43. **Минайчев В. Е., Зыков В. М.** Высоковакуумная ловушка с автономным микроохладителем. — Приборы и техника эксперимента, 1969, № 6, с. 156—158.
44. **Пенчко Е. А.** Воздухостойкий ионизационный манометр. — Приборы и техника эксперимента, 1961, № 1, с. 170.
45. А. с. № 440555 (СССР). Способ определения величины потока разреженного газа/ Пенчко Е. А.
46. **Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А.** Оборудование для откачки вакуумных приборов. М.: Энергия, 1965. — 503 с.
47. **Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А.** Конструирование и расчет вакуумных систем. М.: Энергия, 1970. — 504 с.
48. **Пипко А. И., Плисковский В. Я.** Вакуумная система пяти-местного полуавтомата откачки СВЧ-вакуумных приборов. — Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности, 1965, № 3, с. 21—25.
49. **Многотрубная централизованная форвакуумная система** [Пипко А. И., Плисковский В. Я., Гаврилов А. А. и др.]. — Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности, 1966, № 8, с. 23—27.
50. **Безмасляный сверхвысоковакуумный пост откачки** [Пипко А. И., Плисковский В. Я. и др.]. — Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности, 1965, № 7, с. 51—54.
51. **Пипко А. И., Плисковский В. Я.** 16-местный беззолотниковый карусельный полуавтомат. — Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности, 1964, № 9, с. 35—39.
52. **Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пузырский Ю. С.** Вакуумная задвижка. — Приборы и техника эксперимента, 1965, № 3, с. 230—232.
53. **Пипко А. И., Плисковский В. Я., Трубников Ю. Ф.** Откачные ячейки для электровакуумных приборов. — Электронная техника, Сер. 10, 1969, № 7 (32), с. 47—53.
54. **Коммутирующие элементы многотрубной централизованной форвакуумной системы.** — Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности (НИИЭИР), 1967, вып. 4, стр. 38. Авт.: Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пузырский Ю. С. и др.
55. **Механизмы для перемещения деталей в вакуумных и водородных печах сопротивления** [Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пузырский Ю. С.]. — Электротермия, 1965, вып. 45, с. 17—21.
56. **Двухроторный вакуумный насос со встроенным электродвигателем герметичного исполнения** [Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пузырский Ю. С. и др.]. — Электронная техника, Сер. 10, 1966, вып. 10, с. 40—44.
57. **Пипко А. И., Плисковский В. Я.** Устройства для передачи движения в вакуумный объем. — Приборы и техника эксперимента, 1965, № 6, с. 12—18.
58. А. с. № 195810 (СССР). Вакуумный прогреваемый вентиль/ Плисковский В. Я., Пипко А. И., Гаврилов А. А. и др.
59. А. с. № 321871 (СССР). Полуавтомат откачки электровакуумных приборов/ Пипко А. И., Плисковский В. Я., Трубников Ю. Ф. и др.
60. А. с. № 171930 (СССР). Механизированная поточная установка/ Пипко А. И., Плисковский В. Я., Векшинский С. А. и др.
61. А. с. № 321871 (СССР). Полуавтомат откачки электровакуумных приборов/ Пипко А. И., Плисковский В. Я. и др.
62. А. с. № 334602 (СССР). Карусельная машина для откачки вакуумных приборов/ Пипко А. И., Плисковский В. Я., Трубников Ю. Ф.
63. **Методы измерения потока разреженного газа** [Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. и др.]. — Электронная техника, Сер. 1, 1974, вып. 6, с. 3—16.
64. А. с. № 476473 (СССР). Способ определения скорости газовой выделенной в вакуумном объеме/ Пипко А. И., Плисковский В. Я., Златкис И. В. и др.
65. А. с. № 187889 (СССР). Предохранительное устройство к форвакуумной системе/ Пипко А. И., Плисковский В. Я., Семёнова Ю. С. и др.
66. А. с. № 300701 (СССР). Прогреваемый вентиль/ Пипко А. И., Плисковский В. Я., Трубников Ю. Ф.
67. А. с. № 193670 (СССР). Защитное устройство/ Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пазаров А. С. и др.
68. **Плисковский В. Я.** Конструкционные материалы и элементы вакуумных систем. М.: Машиностроение, 1976. — 64 с.
69. **Плисковский В. Я., Суконник М. С., Шишкин В. А.** Измерение интенсивности потоков паров вакуумных масел с помощью автоэлектронного проектора. — Техническая физика, 1974, № 10, с. 2178—2185.
70. А. с. № 244700 (СССР). Способ определения потоков сложных углеводородов в вакуумных системах/ Плисковский В. Я., Шишкин В. А.
71. **Рафальсон А. Э., Шерешевский А. М.** Масс-спектрометрические приборы. М.: Атомиздат, 1968. — 235 с.
72. **Розанов Л. Н.** Вакуумные машины и установки. М.: Машиностроение, 1975. — 336 с.
73. **Рот А.** Вакуумные уплотнения. М.: Энергия, 1974. — 464 с.
74. А. с. № 318822 (СССР). Устройство для измерения малых газовых потоков/ Сакаганский Г. Л.
75. **Тягунов Г. А.** Основы расчета вакуумных систем. М.: Госэнергоиздат, 1948. — 148 с.
76. А. с. № 211981 (СССР). Задвижка для вакуумных систем/ Усов В. В., Долматов Ю. Л., Романов А. А. и др.
77. **Феодосьев В. И.** Ультружные элементы точного приборостроения. М.: Оборонгиз, 1949. — 342 с.

78. Френкель Я. И. Теория явлений конденсации и адсорбции. Собрание избранных трудов. Т. II, М.: Изд-во АН СССР, 1958, с. 239.

79. Цейтлин А. Б. Пароструйные вакуумные насосы. М.: Энергия, 1965. — 400 с.

80. Черепнин Н. В. Вакуумные свойства материалов для электронных приборов. М.: Советское радио, 1966. — 350 с.

81. Черепнин Н. В. Сорбционные явления в вакуумной технике. М.: Советское радио, 1973. — 384 с.

82. Черепнин Н. В. Основы очистки, обезгаживания и откачки в вакуумной технике. М.: Советское радио, 1967. — 408 с.

83. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. — 712 с.

84. Эспе В. Технология электровакуумных материалов. Т. 1. М.: Госэнергоиздат, 1960. — 613 с.

85. Эшбах Г. Л. Практические сведения по вакуумной технике. М.: Энергия, 1966. — 295 с.

86. Языков Н. А. Безмасляный механический форвакуумный насос. — Электронная техника. Сер. 1, 1973, вып. 10, с. 126—128.

87. A van Oostrom, Requirements for partial pressure analysers from the user's point of view. — «Vacuum», 1972, v. 22, № 1, p. 15.

88. Baker W. C. Measuring von Gasdurchfluß in durch und aus einem Vakuumsystem. — «Vakuu-Technik», 1970, Bd 19, № 5, S. 113.

89. Baker M. A., Laurenson L. Применение сорбционных ловушек на линии форвакуума. — «Vacuum», 1969, № 2, p. 81.

90. Barton R. S., Govier R. P. The effect of cleaning technique of the outgassing rate of 18/19/1 stainless steel. — «Vacuum», 1970, v. 20, № 1, p. 1.

91. Biguonet Ch. Spectrometrie de masse dans l analyse des gas residuels. — «Le Vide», 1972, № 159—160, h. 147.

92. Dayton B. B. The effect of bake-out on the degassing of metals. — «Trans. of the Ninth Nat. Vac. Symp. The MacMillan Comp.», 1962, p. 293—300.

93. Davis D. H. Monte-Carlo Calculation of Molecular Flow. — «J. Appl. Phys.», 1960, v. 31, № 7, p. 1169—1176.

94. Eder F. X. Физические основы работы криогенных насосов. — «Schweiz. Arch. angew. Wiss. und Techn.», 1967, Bd 33, № 3, S. 69—76.

95. Naarhus G. J. Использование криогенераторов Стирлинга в качестве вакуумных насосов. — «Vide», 1974, № 171—172, p. 351—354.

96. Hobson J. P. Основные параметры аккомодационных насосов. — «Vacuum», 1971, v. 21, № 11, p. 527—529.

97. Пат. № 3694691 (США). Сублимационный геттерный насос с катодным пусковым устройством/ Lafferty James M.

98. Milleon N. Изоляционные и криосорбционные ловушки с пористым металлом в вакуумной технике. — Trans. 3-d Inter. Vac. Congr. Stuttgart, 1965, v. 2, part 1, p. 189—192.

99. Steward L. M. Фланцевое соединение для высоковакуумных устройств. — «J. Vac. Sci. and Technol.», 1973, v. 10, № 1, p. 20—21.

100. Verheyden L. Новые металлические уплотнения для высокого и сверхвысокого вакуума. — «Vacuum», 1971, v. 21, № 9, p. 401—411.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к третьему изданию	3
Часть первая. Теоретические основы вакуумной техники	5
Глава первая. Основные понятия кинетической теории газов	5
1-1. Давление и плотность газа	5
1-2. Закон Бойля—Мариотта	7
1-3. Закон Авогадро	8
1-4. Уравнение состояния идеального газа	8
1-5. Скорость теплового движения молекул идеального газа	9
1-6. Средняя длина свободного пути	10
1-7. Объем газа, занимаемый молекулами, ударяющимися о поверхность стенки	13
1-8. Внутреннее трение в газах	13
1-9. Диффузия газов	15
1-10. Теплопроводность газов	17
1-11. Термомолекулярное течение	21
Глава вторая. Теоретические основы процесса откачки	22
2-1. Основные определения вакуумной техники	22
2-2. Сопротивление и проводимость сложного вакуумного трубопровода	24
2-3. Основное уравнение вакуумной техники	25
2-4. Процессы изменения состояния газа в вакуумных системах	26
2-5. Критерии определения границ режимов течения газа в трубопроводах	28
2-6. Расчет длительности откачки	31
Глава третья. Взаимодействие газов с твердыми телами	37
3-1. Газовыделение деталей и стенок вакуумной системы	37
3-2. Адсорбция и десорбция газов	38
3-3. Скорости адсорбции и десорбции	46
Глава четвертая. Растворимость, газосодержание, диффузия, проницаемость	59
4-1. Растворимость и газосодержание в твердых телах	60
4-2. Диффузия и проницаемость газов в твердых телах	63
4-3. Нестационарный процесс диффузии	67

4-4. Совместное влияние диффузии и адсорбции на газо-выделение	77
Глава пятая. Давления паров и диссоциация окислов металлов	79
5-1. Давления паров металлов	79
5-2. Термическая диссоциация окислов металлов	81
5-3. Скорости реакций диссоциации	85
Часть вторая. Расчет вакуумных систем	88
Глава шестая. Проводимость элементов вакуумных систем	88
6-1. Истечение газа через отверстия и сопла	88
6-2. Течение газа по трубопроводам	94
6-3. Местные сопротивления	120
6-4. Течение газа через капилляр	124
Глава седьмая. Согласование вакуумных насосов	127
7-1. Согласование насосов, работающих последовательно	127
7-2. Расчет форвакуумного баллона	129
7-3. Согласование вакуумных насосов, работающих параллельно	129
Глава восьмая. Расчет вакуумных систем	130
8-1. Постановка задачи	130
8-2. Последовательность расчета высоковакуумной системы технологического оборудования	132
8-3. Расчет вакуумной системы с параллельно работающими насосами	137
8-4. Откачка вакуумных систем с протяженными камерами	140
8-5. Расчет централизованной форвакуумной системы	142
8-6. Откачка двух последовательно соединенных объемов	150
Часть третья. Конструирование вакуумных систем	152
Глава девятая. Элементы вакуумных систем	152
9-1. Разборные вакуумные соединения	152
9-2. Элементы соединений вакуумных трубопроводов	169
9-3. Электрические вакуумные вводы	171
9-4. Смотровые окна (иллюминаторы)	174
9-5. Устройства для передачи движения в вакуумный объем	176
9-6. Расчет герметизирующих гибких элементов	198
Глава десятая. Коммутационная аппаратура	205
10-1. Основные требования, предъявляемые к коммутационной аппаратуре	205
10-2. Коммутационная аппаратура для непрогреваемых вакуумных систем	206

10-3. Коммутационная аппаратура для прогреваемых вакуумных систем	225
10-4. Блочное исполнение вакуумной коммутационной аппаратуры	234
10-5. Устройства аварийного перекрытия трубопроводов	236
10-6. Устройства для напуска газа в вакуумные системы (натекатели)	243
10-7. Золотники	246

Глава одиннадцатая. Вакуумные насосы 249

11-1. Классификация и основные параметры вакуумных насосов	249
11-2. Насосы объемного действия	258
11-3. Эжекторные насосы	269
11-4. Молекулярные насосы	272
11-5. Сорбционные насосы	283
11-6. Криогенные насосы	304
11-7. Контроль основных параметров вакуумных насосов	312

Глава двенадцатая. Ловушки 315

12-1. Назначение и основные требования, предъявляемые к ловушкам	315
12-2. Механические ловушки	317
12-3. Низкотемпературные охлаждаемые ловушки	321
12-4. Адсорбционные ловушки	327

Глава тринадцатая. Конструкционные материалы 331

13-1. Основные требования, предъявляемые к конструкционным материалам	331
13-2. Металлы и их сплавы	333
13-3. Неметаллические материалы	334
13-4. Рабочие жидкости для вакуумных насосов	338

Глава четырнадцатая. Аппаратура для измерения полного давления разреженного газа 342

14-1. Приборы для измерения давления низкого классификация	342
14-2. Методические особенности использования вакуумметрической аппаратуры	347
14-3. Деформационные вакуумметры	351
14-4. Тепловые вакуумметры	353
14-5. Электронные пенициллиновые вакуумметры	364
14-6. Магнитные электрорезистивные вакуумметры	375

Глава пятнадцатая. Высоковакуумные газоанализаторы 388

15-1. Классификация газоанализаторов	388
15-2. Спектр масс и его расшифровка	392
15-3. Статические масс-спектрометры с разделением ионов в магнитном поле	398
15-4. Времяпролетный масс-спектрометр	400
15-5. Резонансный раточастотный масс-спектрометр	402
15-6. Квадрупольный и монополярный масс-спектрометры	408

Глава шестнадцатая. Методы измерения потока разреженного газа	411
16-1. Классификация методов	411
16-2. Метод накопления	419
16-3. Метод накопления с изолируемым манометрическим преобразователем	422
16-4. Метод накопления с анализом динамики изменения давления	423
16-5. Метод калиброванного потока	428
16-6. Метод калиброванного сопротивления и двух манометрических преобразователей	430
16-7. Метод двух калиброванных сопротивлений и одного манометрического преобразователя	431
16-8. Метод, использующий насос с высокой скоростью действия	432
16-9. Метод модуляции потока газа на выходе из измерительной камеры	433
16-10. Метод модуляции потока газа на входе в измерительную камеру	436
16-11. Метод перемещающегося сопротивления	437
16-12. Метод порционного перепуска — объемный измеритель потока	438
16-13. Методы дозирования потока газа	440
Глава семнадцатая. Принципы построения вакуумных систем	443
17-1. Основные требования, предъявляемые к вакуумным системам	443
17-2. Непрогреваемые вакуумные системы	444
17-3. Высоковакуумные системы	448
17-4. Вакуумные системы карусельных и конвейерных машин	454
17-5. Централизованная форвакуумная система	460
Приложения	463
Основные обозначения	493
Список литературы	496