

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.И. Иванов

ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2016

УДК 621.521
ББК 31.77
И 20

Иванов В.И. Вакуумная техника: Учеб. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 129 с.

Изложены основы теории вакуума, расчета, конструирования и эксплуатации вакуумных систем. Приводятся основные современные средства откачки, измерения вакуума и обнаружения негерметичности вакуумных систем.

Предназначено для бакалавров направлений 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения, 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика очной и заочной форм обучения.

Рецензенты: ООО «Адсорбционная техника» (кандидат техн. наук, доц. Ю.Я. Игнатов); кандидат техн. наук Ю.А. Савченко (ЗАО «Лентехгаз»)

Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 10 от 25.06.2014 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016

© Иванов В.И., 2016

ВВЕДЕНИЕ

Вакуум широко используется в самых разнообразных отраслях промышленности и науки. Не являются исключением и криогенные системы, для которых вакуумное оборудование стало неотъемлемой составной частью. В криогенике вакуум используется, прежде всего, для целей изоляции.

При создании в изоляционной полости достаточно высокого вакуума перенос тепла теплопроводностью газа практически исключается и приток тепла из окружающей среды осуществляется в основном излучением. Заслуга значительного усовершенствования сосудов с вакуумной изоляцией принадлежит Дж. Дьюару, который разработал в 1893 г. способ уменьшения переноса тепла излучением путем серебрения стеклянных стенок сосуда. Дьюар предложил также использовать адсорбент (активированный уголь) для улучшения и длительного сохранения вакуума, что позволило изготавливать сосуды из металлов, выделяющих в вакууме большое количество газов по сравнению со стеклом. Работы М.М. Смолуховского, Р. Петерсена, М.М. Фулка и российских ученых А.Ф. Чудновского, М.Г. Каганера позволили разработать более эффективные виды изоляции в технике низких температур: вакуумно-порошковую и вакуумно-многослойную.

Вакуум необходим криогенике также для регенерации различных сорбентов в блоках очистки и осушки газов. Он применяется для снижения температуры кипения криогенных жидкостей в ваннах предварительного охлаждения ожижителей и криостатов, для отверждения криогенных жидкостей и получения их шугообразного состояния, для вакуумирования коммуникаций и оборудования криогенных установок перед заполнением их рабочим газом: гелием, водородом или неоном.

В последнее время криогеника все чаще выступает не как «потребитель» вакуума, а как «поставщик». Развитие криогенной техники послужило стимулом для широкого применения криогенных конденсационных и сорбционных вакуумных насосов. Получение вакуума ниже 10^{-5} Па или обеспечение большой скорости откачки при среднем вакууме являются сложными техническими задачами. Криогенные вакуумные насосы содействуют их решению, а в некоторых случаях являются единственным приемлемым средством откачки. Сюда можно отнести крионасосы огромных барокамер, в которых

имитируется космическое пространство, или крионасосы крупных аэродинамических труб разреженного газа. Наконец, криогенные вакуумные насосы являются одним из наиболее эффективных средств создания «чистого» вакуума, в чем особенно заинтересованы современные отрасли науки и техники.

В учебном пособии представлены в кратком изложении некоторые аспекты кинетической теории газов и поверхностных процессов, которые лежат в основе принципа действия различных средств откачки. Приводится описание ряда конструкций вакуумных насосов. Даются основы построения вакуумных систем, контроля вакуума и течеискания.

1. ВАКУУМ. НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

Обычно вакуумом считают состояние газа при давлении ниже атмосферного. Однако с физической точки зрения вакуум наступает лишь тогда, когда разреженный газ приобретает качественно новые свойства. Например, по мере понижения давления газа его коэффициент теплопроводности вначале остается постоянным, а при достижении определенного разрежения наступает пропорциональная зависимость от давления. Это новое состояние газа называют вакуумом.

Любое пространство, ограниченное поверхностями, содержит некоторое количество свободного газа непосредственно в объёме и связанного газа, адсорбированного на поверхностях. Адсорбированные частицы газа с поверхности диффундируют в материал стенок (абсорбируются) и могут перемещаться в них. В равновесном состоянии переход молекул (атомов) свободного газа в адсорбированное и далее в абсорбированное состояние уравнивается обратными процессами.

1.1. Уравнение состояния идеального газа

Свободный газ при давлении ниже атмосферного близок по свойствам к идеальному и подчиняется уравнению состояния Клапейрона–Менделеева

$$p\nu = R_0T \quad (1.1)$$

или

$$p = nkT, \quad (1.2)$$

где p – давление, Па; ν – удельный объём, м³/кмоль; $R_0 = 8314$ Дж/(кмоль·К); T – абсолютная температура, К; n – число частиц газа в единице объёма, 1/м³; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$, Дж/К – постоянная Больцмана.

Для G кг газа уравнение состояния примет вид

$$pV = GRT, \quad (1.3)$$

где V – объём газа, м³; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Из уравнения (1.3) следуют

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \text{const} \quad (1.4)$$

и частные случаи, когда один из трёх параметров газа (p , V или T) оказывается постоянным. Например, при $T = \text{const}$ получим закон Бойля–Мариотта

$$p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (1.5)$$

1.2. Средняя арифметическая скорость молекул

Когда свободный газ находится в состоянии равновесия, то нет предпочтительных направлений движения молекул, все они движутся хаотично (тепловое движение), сталкиваясь между собой и ограничивающими поверхностями. Несмотря на беспорядочность движения молекул и случайный характер столкновений, изменяющих их скорость и направление полёта, распределение молекул по скоростям оказывается вполне определённым, соответствующим закону Максвелла. Согласно этому закону, в газе нет неподвижных молекул и нет молекул с бесконечно большими скоростями. Функция распределения Максвелла позволяет вычислить среднюю арифметическую скорость движения молекул, под которой подразумевается отношение суммы скоростей всех молекул в единице объёма к числу молекул в этом объёме:

$$w_a = \sqrt{\frac{8R_0 T}{\pi M}}. \quad (1.6)$$

Среднее арифметическое значение составляющей скорости по какой-либо координатной оси, например параллельно оси X ,

$$w_x = \sqrt{\frac{2R_0 T}{\pi M}}. \quad (1.7)$$

Из уравнений (1.6) и (1.7) следует, что

$$w_x = \frac{1}{2} w_a. \quad (1.8)$$

1.3. Частота соударений молекул газа с поверхностью

Предположим, что площадка площадью F расположена нормально к координатной оси X . Молекулы движутся вдоль оси X со скоростью w_x , причём только половина из них, т. е. $0,5 n$, движется к площадке, а вторая половина движется в противоположном направлении. За время τ на площадку налетит $\frac{1}{2}nw_xF\tau$ молекул, следовательно, на единицу площади за единицу времени налетит $\nu = \frac{1}{2}nw_x$ молекул. С учётом уравнения (1.8)

$$\nu = \frac{1}{4}nw_a. \quad (1.9)$$

1.4. Средняя длина свободного пробега молекул

В результате хаотичного движения молекулы непрерывно сталкиваются друг с другом. Среднее расстояние, которое молекулы проходят между столкновениями, называется длиной свободного пробега:

$$\bar{l} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2n\left(1+\frac{C}{T}\right)} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2n\left(1+\frac{C}{T}\right)p} = \frac{B \cdot 10^{-5}T}{1+\frac{C}{T}}. \quad (1.10)$$

В табл. 1.1 приведены численные значения диаметров молекул σ , постоянных Сюзерленда C и коэффициента B для ряда газов, используя которые можно определить среднюю длину свободного пробега молекул в зависимости от давления и температуры.

Таблица 1.1

Характеристика молекул некоторых газов [1]

Газ	He	H ₂	N ₂	O ₂	Воздух	H ₂ O
$\sigma \cdot 10^{10}, \text{м}$	2,15	2,70	3,70	3,56	3,67	3,0
$C, \text{К}$	83	73	104	125	112	470
$B \cdot 10^5, \text{м/К}$	6,73	4,26	2,27	2,45	2,31	3,45

В табл. 1.2 приведены значения длины свободного пробега молекул азота.

Таблица 1.2

Средняя длина свободного пробега молекул азота \bar{l} , м

T, K	p, Pa		
	10^5	10^0	10^{-3}
293	$4,91 \cdot 10^{-8}$	$4,91 \cdot 10^{-3}$	4,91
80	$0,79 \cdot 10^{-8}$	$0,79 \cdot 10^{-3}$	0,79
20	$0,073 \cdot 10^{-8}$	$0,073 \cdot 10^{-3}$	0,073

1.5. Коэффициенты переноса в газах

Интенсивность переноса теплоты, количества движения и массы в газах характеризуется соответственно коэффициентами: теплопроводности λ , динамической вязкости η и диффузии D , приближенные значения которых равны:

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho \bar{l} w_a c_v; \quad (1.11)$$

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{l} w_a; \quad (1.12)$$

$$D = \frac{1}{3} \bar{l} w_a. \quad (1.13)$$

Из входящих в эти уравнения величин только плотность ρ и длина свободного пробега \bar{l} зависят от давления. Причём ρ пропорциональна давлению, а \bar{l} обратно пропорциональна давлению газа. Следовательно, коэффициенты теплопроводности и динамической вязкости не зависят от давления, поскольку произведение $\rho \bar{l} = \text{const}$, в то время как коэффициент диффузии растёт с падением давления.

Такая ситуация сохраняется в плотном газе до тех пор, пока средняя длина свободного пробега молекул пренебрежимо мала по сравнению с характерным размером объекта d , содержащим газ (расстояние между стенками с разной температурой или диаметр трубы, по которой происходит перенос газа).

По мере снижения давления длина свободного пробега молекул может стать соизмеримой с величиной d и превысить её. Молекулы газа практически перестанут сталкиваться между собой, а будут сталкиваться лишь со стенками объекта. Такое разрежение, когда $\bar{l} > d$, в физике называют вакуумом.

Поскольку длину пробега молекул в вакууме ограничивают только размеры объекта d , уравнения (1.11), (1.12) и (1.13) примут вид

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho d w_a c_v; \quad (1.14)$$

$$\eta = \frac{1}{3} \rho d w_a; \quad (1.15)$$

$$D = \frac{1}{3} d w_a. \quad (1.16)$$

Согласно последним уравнениям, λ и η теперь изменяются пропорционально давлению (плотности) газа, а коэффициент диффузии D перестал зависеть от него. Кроме того, эти коэффициенты стали «условными» и перестали быть характеристиками только газа, так как стали зависеть от размера d объекта, а интенсивность переноса теплоты, количества движения или массы в значительной мере теперь определяется характером взаимодействия молекул газа с поверхностью объекта.

1.6. Число Кнудсена

Вакуум – понятие относительное, поскольку радикальное изменение коэффициентов переноса газов наступает при разном давлении и зависит от размера объекта. Например, в объекте с линейным размером $d \approx 5$ м «вакуум» достигается при давлении $p \approx 10^{-3}$ Па (см. табл. 1.2), в объекте с $d \approx 5$ мм – уже при давлении $p \approx 1$ Па; в теплоизоляционном порошке типа БС-50 ($d < 2$ мкм) вакуум между частицами наступает при давлении $p \approx 2000$ Па.

Процессы, протекающие в вакуумных системах, существенно зависят от того, какие взаимодействия молекул доминируют – взаимные соударения между собой или столкновения со стенками объекта. Для характеристики условий, реализуемых в конкретных вакуумных объектах, используется число Кнудсена, которое представляет собой отношение средней длины свободного пробега молекул \bar{l} к характерному размеру d объекта (например, диаметр сосуда или трубы, расстояние между стенками и т. д.):

$$Kn = \frac{\bar{l}}{d}. \quad (1.17)$$

На основании величины числа Кнудсена вакуумные объекты (кроме микро- и макрообъектов) подразделяются:

- на низковакуумные ($Kn \ll 1, p \approx 10^5 \div 10^2$ Па);
- средневакуумные ($Kn \approx 1, p \approx 10^2 \div 10^{-1}$ Па);
- высоковакуумные ($Kn \gg 1, p \approx 10^{-1} \div 10^{-5}$ Па);
- сверхвысоковакуумные ($p < 10^{-5}$ Па).

Следовательно, при наличии потока газа в объекте число Кнудсена определяет режим течения: вязкостный, переходный или молекулярный. Так, в трубах круглого сечения реализуется вязкостный (ламинарный) режим, если $Kn < 0,01$; молекулярный – при $Kn > 0,33$ и переходный, если $0,01 < Kn < 0,33$.

2. ЭЛЕМЕНТЫ РАСЧЕТА ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ, РАБОТАЮЩЕЙ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Типовая схема вакуумной системы (рис. 2.1) состоит из трех основных элементов: объекта откачки (камеры), вакуумного насоса и трубопровода, соединяющего объект с насосом.

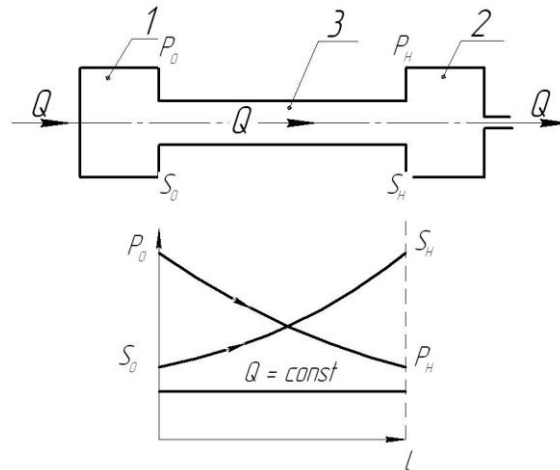


Рис. 2.1. Типовая схема вакуумной системы:
1 – объект откачки (камера); 2 – вакуумный насос; 3 – трубопровод

2.1. Основное уравнение вакуумной техники

В камеру (см. рис. 2.1) поступает постоянный во времени поток газа Q – объемный расход газа, находящегося при определенном давлении. Поток имеет размерность $Q \left[\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}} \right]$ или [Вт]. Поступающий в камеру поток газа отводится по трубопроводу к насосу, где газ сжимается и выводится из насоса. Согласно теории обобщенной проводимости, вакуумная система является аналогом электрической цепи, в которой роль напряжения играет перепад давления на концах трубопровода ($p_0 - p_H$), возникающий из-за гидравлического сопротивления R последнего, а поток газа Q служит аналогом силы тока в электрической цепи.

Тогда

$$Q = \frac{p_0 - p_H}{R} = (p_0 - p_H)U, \quad (2.1)$$

где $U = \frac{1}{R}$ – проводимость трубопровода, $\text{м}^3/\text{с}$.

Поскольку поток газа постоянен в любом сечении вакуумной системы, то его можно представить как объем газа S_0 при давлении p_0 , поступающего в единицу времени из камеры в трубопровод, или как объем газа S_n при давлении на входе в насос p_n , поступающего в единицу времени из трубопровода во входное сечение насоса:

$$Q = S_0 p_0 = S_n p_n = \text{const}, \quad (2.2)$$

где S_0 – скорость откачки объекта, м³/с; S_n – быстрота действия насоса, м³/с.

Как показано на рис. 2.1, давление падает при движении газа по трубопроводу, а объемный расход растет, величина потока газа Q при этом остается неизменной. Из уравнений (2.1) и (2.2) следует

$$\frac{Q}{U} = p_0 - p_n \text{ или } \frac{Q}{U} = \frac{Q}{S_0} - \frac{Q}{S_n}.$$

Сократив величину Q , получим

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}. \quad (2.3)$$

Последнее выражение представляет собой основное уравнение вакуумной техники, которое связывает между собой основные характеристики элементов вакуумной системы: скорость откачки объекта, быстроту действия вакуумного насоса и проводимость канала, соединяющего объект с насосом. Из уравнения (2.3) следует, что в большинстве практических ситуаций скорость откачки объекта S_0 меньше по величине быстроты действия насоса S_n и проводимости трубопровода U . Лишь тогда, когда $U = \infty$ (трубопровод отсутствует), $S_0 = S_n$. Если проводимость трубопровода мала ($U \ll S_n$), то $S_0 \approx U$, т. е. скорость откачки объекта практически не зависит от быстроты действия насоса S_n и определится лишь проводимостью трубопровода.

Поскольку стоимость вакуумного насоса обычно значительно превышает стоимость трубопровода, который соединяет насос с объектом, то необходимо стремиться повышать скорость откачки объекта S_0 не за счет увеличения S_n , а путем увеличения U . Насколько успешно это удаётся, показывает коэффициент использования насоса, представляющий отношение S_0 к S_n :

$$K_n = \frac{S_0}{S_n}. \quad (2.4)$$

При непосредственном подсоединении насоса к объекту (трубопровод отсутствует) $S_0 = S_n$ и $K_n = 1$, во всех других случаях $K_n < 1$. В реальных вакуумных системах желательно иметь коэффициент использования насоса в пределах $K_n = 0,3 \div 1,0$.

2.2. Проводимость элементов вакуумных систем

Если поток газа возникает из-за разности давлений ($p_1 - p_2$) в двух точках вакуумной системы, то отношение величины потока Q к указанной разности давлений называют проводимостью (пропускной способностью) вакуумной системы между данными точками:

$$U = \frac{Q}{p_1 - p_2}. \quad (2.5)$$

Проводимость является основной величиной, характеризующей транспортные каналы вакуумных систем. Она определяется геометрией, размерами канала и режимом течения газа. Проводимость численно равна количеству газа, протекающего через коммуникацию в единицу времени, при разности давлений на ее концах, равной единице. Проводимость имеет размерность $\text{м}^3/\text{с}$, т. е. такую же, что и скорость откачки объекта S_0 и быстрота действия насоса S_n .

Для сложных каналов значения проводимости отдельных участков рассчитывают порознь; общую проводимость всего канала определяют по следующим формулам:

при последовательном соединении n отдельных участков

$$\frac{1}{U} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{U_i}; \quad (2.6)$$

при параллельном их соединении

$$U = \sum_{i=1}^{i=n} U_i. \quad (2.7)$$

2.2.1. Проводимость отверстия при вязкостном режиме течения газа

На рис. 2.2 показана система, состоящая из двух полостей, разделенных тонкой пластиной с отверстием. Толщина пластины беско-

нечно мала, а диаметр отверстия d в пластине несопоставимо мал по сравнению с диаметрами D полостей. Давление газа в левой полости p_1 больше, чем давление газа в правой полости p_2 . В результате перепада давлений $(p_1 - p_2)$ между полостями происходит истечение газа через отверстие из левой полости в правую.

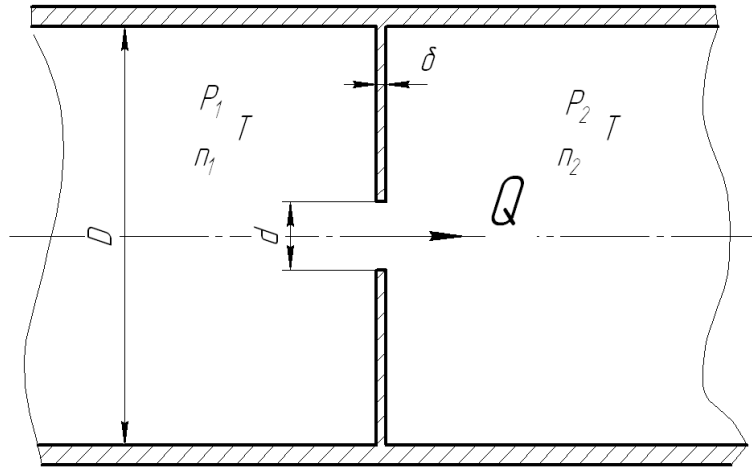


Рис. 2.2. Схема истечения газа через отверстие в тонкой пластине
 $D \gg d, d \gg \delta$

Проводимость отверстия зависит от отношения давлений газа

до и после неё. При условии $1 \geq \frac{p_2}{p_1} \geq \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\text{кр}} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$

$$U_{\text{о.в}} = F \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{R_0 T_1}{M} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k}{k+1}} \right]}, \quad (2.8)$$

где F – площадь отверстия; p_1, T – давление и температура газа в полости, из которой вытекает газ; p_2 – давление в полости за отверстием; k – показатель адиабаты.

Из выражения (2.8) следует, что по мере снижения отношения давлений $\frac{p_2}{p_1}$ от 1 до $\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\text{кр}}$ проводимость отверстия увеличивается от нуля до предельного максимального значения, при котором скорость истечения достигает местной скорости звука $a_m = \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{R_0 T}{M}}$.

Дальнейшее снижение величины отношения $\frac{P_2}{P_1}$ ниже критического

значения $\left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{\text{кр}}$ не влияет на проводимость отверстия. При условии

$\frac{P_2}{P_1} < \left(\frac{P_2}{P_1}\right)_{\text{кр}} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ проводимость отверстия остается постоянной и равной максимальному значению:

$$U_{\text{о.в. max}} = F \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{R_0 T_1}{M}}. \quad (2.9)$$

2.2.2. Проводимость отверстия при молекулярном режиме течения газа

При молекулярном режиме молекулы газа движутся хаотично, не взаимодействуя друг с другом. Поэтому число молекул, покидающих через отверстие левую полость (см. рис. 2.2), равно, согласно (1.9),

$$N_1 = \frac{1}{4} F n_1 w_1,$$

чему соответствует объемный расход газа

$$V_1 = \frac{1}{4} F w_1 = \frac{1}{4} F \sqrt{\frac{8 R_0 T_1}{\pi M}} = 36,4 F \sqrt{\frac{T}{M}}$$

или поток газа

$$Q_1 = p_1 V_1 = 36,4 p_1 F \sqrt{\frac{T}{M}}.$$

За тот же период времени правую полость покинет через отверстие поток газа

$$Q_2 = p_2 V_2 = 36,4 p_2 F \sqrt{\frac{T}{M}}.$$

Результирующий поток газа через отверстие составит

$$Q = Q_1 - Q_2 = 36,4 F \sqrt{\frac{T}{M}} (p_1 - p_2),$$

а проводимость отверстия

$$U_{o.m} = \frac{Q}{P_1 - P_2} = 36,4 F \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (2.10)$$

Как следует из (2.10), проводимость отверстия в молекулярном режиме течения газа не зависит от давления, а определяется родом газа, температурой газа и размером отверстия.

2.2.3. Идеальный вакуумный насос

Идеальным насосом можно считать отверстие в тонкой пластине, за которой абсолютный вакуум. Все молекулы газа, пересекающие плоскость отверстия, безвозвратно уходят. Быстрота действия идеального насоса в молекулярном режиме течения газа

$$S_{т.м} = 36,4 F \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (2.11)$$

а в вязкостном режиме

$$S_{т.в} = F \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{R_0 T}{M}}. \quad (2.12)$$

На рис. 2.3 показан характер изменения быстроты действия идеального вакуумного насоса при откачке воздуха ($M = 29$; $k = 1,4$; $T = 293$ К). Площадь входного отверстия насоса $F = 0,01$ м².

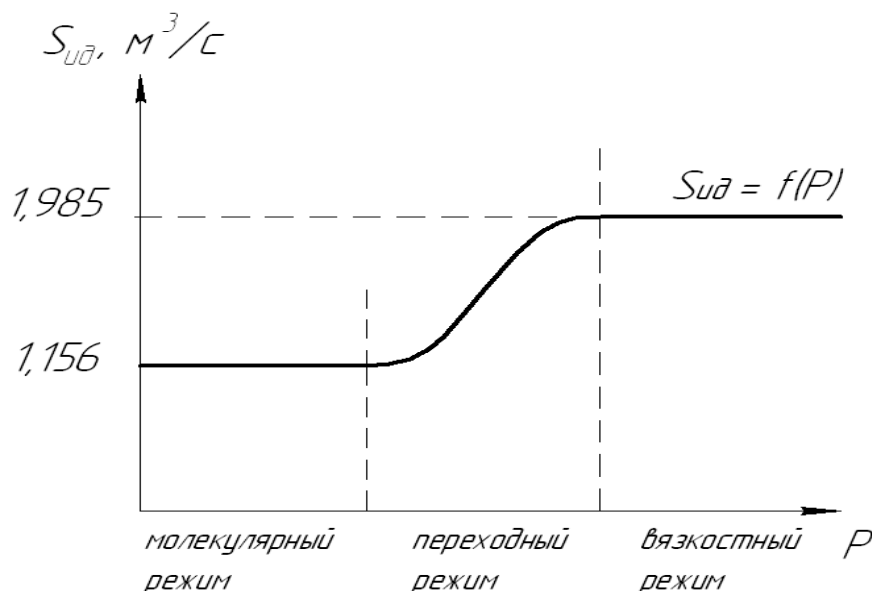


Рис. 2.3. Характер изменения быстроты действия идеального насоса в зависимости от давления откачиваемого газа (режима течения)

2.2.4. Проводимость трубопровода при вязкостном режиме течения газа

Проводимость длинного трубопровода ($l > 20 d$) круглого сечения при вязкостном режиме течения газа

$$U_{\text{тр}} = \frac{\pi d^4}{128 \eta l} \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (2.13)$$

где l – длина трубопровода; d – диаметр трубопровода; η – коэффициент динамической вязкости газа; p_1 и p_2 – давление газа на входе и выходе из трубопровода.

У коротких труб ($l < 20 d$) проводимость входного отверстия оказывает существенное влияние и его следует учитывать. Короткий трубопровод рассматривают как систему, состоящую из двух элементов, соединённых последовательно, и проводимость находят из выражения

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_l} + \frac{1}{U_{\text{отв}}}, \quad (2.14)$$

где U_l – проводимость короткого трубопровода, определенная по формуле (2.13) для длинного трубопровода; $U_{\text{отв}}$ – проводимость входного отверстия трубопровода.

2.2.5. Проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения газа

При молекулярном режиме течения газа проводимость протяженного канала может быть выражена через проводимость его входного отверстия и вероятность прохода молекул через данный канал K :

$$U = KU_{\text{отв}} = 36,4 KF \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (2.15)$$

При диффузном рассеянии отраженных от поверхностей молекул и равновесном состоянии газа на входе в канал вероятность прохода численно равна коэффициенту Клаузинга. Значения этого коэффициента для ряда каналов приведены в табл. 2.1, 2.2 [2].

Таблица 2.1

**Коэффициент Клаузинга для труб круглого сечения
длиной l и диаметром d (рис. 2.4)**

l/d	K	l/d	K	l/d	K	l/d	K
0,00	1,0000	1,1	0,4914	3,0	0,2807	20,0	0,0613
0,10	0,9092	1,2	0,4711	3,5	0,2537	25,0	0,0499
0,20	0,8341	1,3	0,4527	4,0	0,2316	30,0	0,0420
0,30	0,7711	1,4	0,4359	4,5	0,2131	35,0	0,0363
0,40	0,7177	1,5	0,4205	5,0	0,1973	40,0	0,0319
0,50	0,6720	1,6	0,4062	6,0	0,1719	45,0	0,0285
0,60	0,6320	1,7	0,3931	7,0	0,1523	50,0	0,0258
0,70	0,5970	1,8	0,3809	8,0	0,1367	500	0,0026
0,80	0,5659	1,9	0,3695	9,0	0,1240	Св. 500	$4d/3d$
0,90	0,5384	2,0	0,3589	10,0	0,1135		
1,00	0,5136	2,5	0,3146	15,0	0,0797		

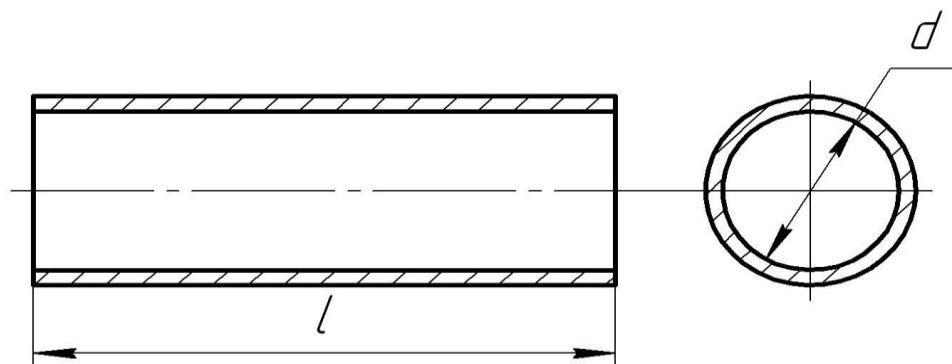


Рис. 2.4. Прямая труба круглого сечения

Таблица 2.2

**Коэффициент Клаузинга для щелевых каналов
прямоугольного сечения $a \gg b$, $a > l$ (рис. 2.5)**

l/b	K	l/b	K	l/b	K	l/b	K
0	1	0,9	0,7049	1,8	0,5640	3,4	0,4318
0,1	0,9525	1,0	0,6848	1,9	0,5525	3,6	0,4205
0,2	0,9096	1,1	0,6660	2,0	0,5417	3,8	0,4099
0,3	0,8710	1,2	0,6485	2,2	0,5215	4,0	0,3999
0,4	0,8362	1,3	0,6321	2,4	0,5032	5,0	0,3582
0,5	0,8048	1,4	0,6168	2,6	0,4865	6,0	0,3260
0,6	0,7763	1,5	0,6024	2,8	0,4712	8,0	0,2789
0,7	0,7503	1,6	0,5888	3,0	0,4570	10,0	0,2475
0,8	0,7266	1,7	0,5760	3,2	0,4439	∞	$(b/l)\ln(l/b)$

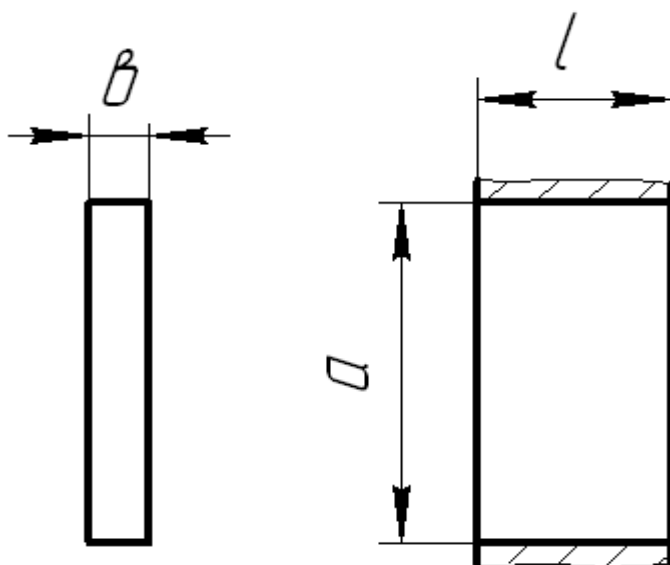


Рис. 2.5. Щелевой канал прямоугольного сечения
 $a \gg b, a > l$

При выполнении инженерных расчетов проводимость сложных трубопроводов, имеющих n колен (поворотов), определяют по уравнению (2.15), но геометрическую длину трубопровода увеличивают:

$$l_p = l + 1,33 \, dn. \quad (2.16)$$

Если трубопровод включает несколько элементов (задвижки, переходники, колена и т. п.), соединённых последовательно, и проводимость каждого элемента может быть определена, то проводимость всего трубопровода находится из выражения

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \dots + \frac{1}{U_i}. \quad (2.17)$$

2.3. Условие равновесия в неизотермических объектах

Возникновение поля температур в вакуумном объекте вызывает перемещение газа из области с более высокой температурой в область, где температура ниже. Это явление называют *тепловой транспирацией*, или термомолекулярным течением, в результате которого между этими областями устанавливается своеобразное условие равновесия.

Допустим, что две части вакуумной камеры «Т» и «Х» (рис. 2.6) соединены друг с другом отверстием F . В одной «теплой» части камеры газ имеет температуру T_t , давление p_t и концентрацию n_t . В другой

«холодной» части камеры, соответственно, T_x , p_x и n_x . Равновесие между частями наступит тогда, когда поток молекул из части «Т» в часть «Х» будет равен обратному потоку.

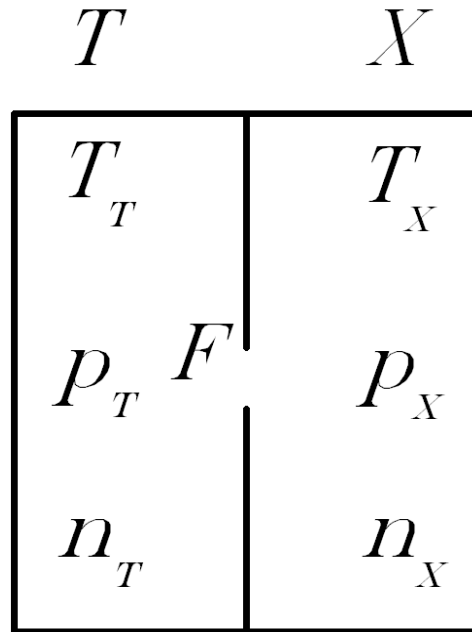


Рис. 2.6. К явлению тепловой транспирации

Согласно уравнению (1.9), при молекулярном режиме поток молекул из части «Т» в часть «Х» равен

$$N_T = \frac{1}{4} n_T \sqrt{\frac{8RT_T}{\pi M}},$$

а обратный поток из части «Х» в часть «Т»

$$N_X = \frac{1}{4} n_X \sqrt{\frac{8RT_X}{\pi M}}.$$

При установившемся равновесии $N_T = N_X$ и, следовательно,

$$n_T \sqrt{T_T} = n_X \sqrt{T_X}$$

или

$$\frac{n_T}{n_X} = \sqrt{\frac{T_X}{T_T}}. \quad (2.18)$$

Используя уравнения (1.2) и (1.6), концентрацию можно выразить через давление газа

$$\frac{P_T}{P_X} = \sqrt{\frac{T_T}{T_X}}. \quad (2.19)$$

Из уравнений (2.18) и (2.19) следует, что при равенстве температуры в обеих частях камеры давление и концентрация газа будут равны. Однако, если температура газа в «тёплой» части будет, например, $T_T = 320$ К, а в «холодной» $T_X = 80$ К, то установится иное равновесное состояние, при котором $p_T = 2p_X$, $n_X = 2n_T$.

Для плотных газов (вязкостный режим) условие равновесия определяется законом Паскаля, согласно которому давление во всех частях камеры одинаковое даже при наличии поля температур:

$$p_T = p_X. \quad (2.20)$$

Это объясняется тем, что в плотном газе столкновения молекул вызывают движение газа в целом в сторону более низкого давления и таким образом давление выравнивается. В разреженном же газе молекулы движутся независимо друг от друга и разность температур не может вызывать движение всего газа.

Используя уравнение состояния идеального газа (1.2), выражение (2.20) можно представить иначе:

$$n_T k T_T = n_X k T_X$$

или

$$n_T T_T = n_X T_X. \quad (2.21)$$

Последнее уравнение показывает, что в плотном газе равенство давлений в разных частях неизотермической камеры сохраняется, поскольку снижение температуры в какой-либо части компенсируется пропорциональным повышением концентрации газа.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА

3.1. Вакуумметры

Приборы, предназначенные для измерения общего давления газа ниже атмосферного, называются *вакуумметрами*. В международной системе мер (СИ) единицей давления является паскаль (ньютон на квадратный метр, сокращенное обозначение которых Па (Н/м^2)). Однако в технической литературе используются и другие единицы измерения давления. Как они соотносятся с паскалем, показано в табл. 3.1

Таблица 3.1

Соотношения между единицами давления

Единицы давления	Па (Н/м^2)	мм рт.ст. (Тор)	Физическая атмосфера, атм	Техническая атмосфера, ат	бар
Па (Н/м^2)	1	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$0,987 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Мм рт.ст. (Тор)	133,32	1	$1,316 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$
Физическая атмосфера, атм	$1,013 \cdot 10^5$	760	1	1,033	1,013
Техническая атмосфера, ат	$0,981 \cdot 10^5$	73556	0,968	1	0,981
бар	10^5	750,24	0,987	1,02	1

Поскольку универсального метода измерения давления, охватывающего диапазон от 10^5 до 10^{-12} Па, не существует, то на практике используют разнообразные типы приборов в зависимости от величины измеряемого давления и условий применения. Для измерения давления используются различные явления, в которых какая-либо физическая величина зависит от давления и ее можно измерить. По принципу действия вакуумметры делятся на жидкостные, деформационные, тепловые и ионизационные. Первые два типа вакуумметров – это приборы прямого измерения. Они измеряют непосредственно давление как

реальную силу воздействия газа на чувствительный элемент датчика. Показания этих приборов не зависят от рода газа. Последние два типа вакуумметров относятся к приборам косвенного измерения, а следовательно, нуждаются в градуировке. В них используются зависимости некоторых физических процессов от давления. Показания вакуумметров такого типа зависят от рода газа.

Области давления, измеряемые вакуумметрами различных принципов действия, показаны на рис. 3.1.

Вакуум															
Низкий			Средний			Высокий			Сверхвысокий						
Жидкостные															
Деформационные															
	Тепловые														
			Ионизационные												
10 ⁵	10 ⁴	10 ³	10 ²	10 ¹	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰

Рис. 3.1. Области давления, измеряемые вакуумметрами, Па

3.1.1. Жидкостные вакуумметры

В жидкостных вакуумметрах измерение давления сводится к изменению разности уровней жидкости в сообщающихся сосудах, т. е. к измерению линейной величины. Данные вакуумметры подразделяются на U-образные и компрессионные.

U-образные вакуумметры – это самые простые приборы. Они состоят из двух сообщающихся сосудов, образованных U-образной стеклянной трубкой, заполненной ртутью или вакуумным маслом. На рис. 3.2 показан U-образный вакуумметр с открытым коленом.

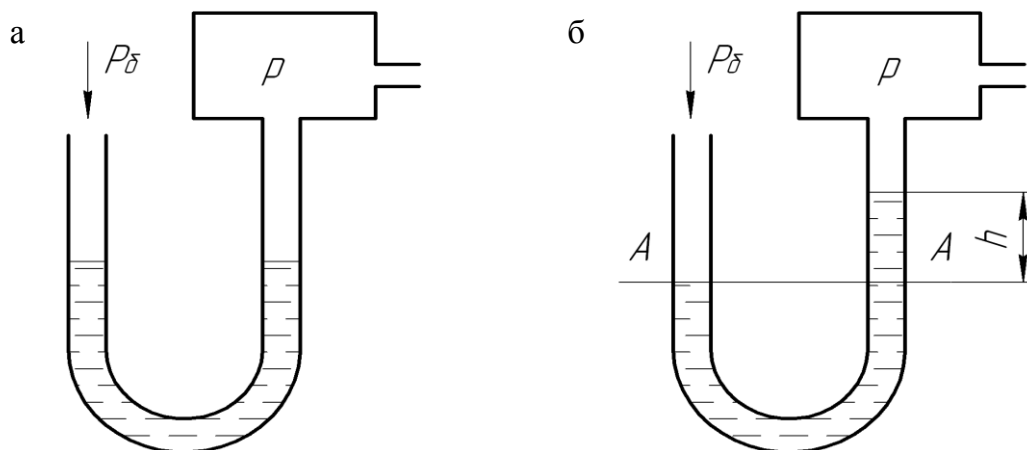


Рис. 3.2. U-образный вакуумметр с открытым коленом:
 а – давление в объекте равно барометрическому ($p = p_б$);
 б – давление в объекте ниже барометрического ($p < p_б$)

Согласно закону Паскаля, давление в сечении $A-A$ в левом и правом коленах равны, т. е.

$$p_б = p + \rho gh.$$

Следовательно, измеряемое давление в объекте

$$p = p_б - \rho gh, \quad (3.1)$$

где $p_б$ – барометрическое давление в момент измерения, Па; ρ – плотность рабочей жидкости в приборе, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; h – перепад уровней жидкости в коленах, м.

Значения плотности ρ (кг/м^3) ряда жидкостей при температуре 293 К, используемых в манометрах этого типа:

Ртуть.....	13546
Масла:	
ВМ-3.....	850
ВМ-5.....	870
5Ф4Э.....	1200

Диапазон измеряемых давлений данным вакуумметром составляет 0–98,0 гПа при погрешности примерно $\pm 0,2$ гПа. К недостаткам U-образного вакуумметра с открытым коленом можно отнести:

- большие размеры (~ 1 м) даже при использовании ртути в качестве рабочей жидкости;
- зависимость показаний от величины барометрического давления в момент проведения измерений;
- хрупкость прибора (стекло) и использование опасной для здоровья ртути.

При измерении давления ниже 10^4 Па удобнее пользоваться укороченным U-образным вакуумметром с закрытым коленом (рис. 3.3).

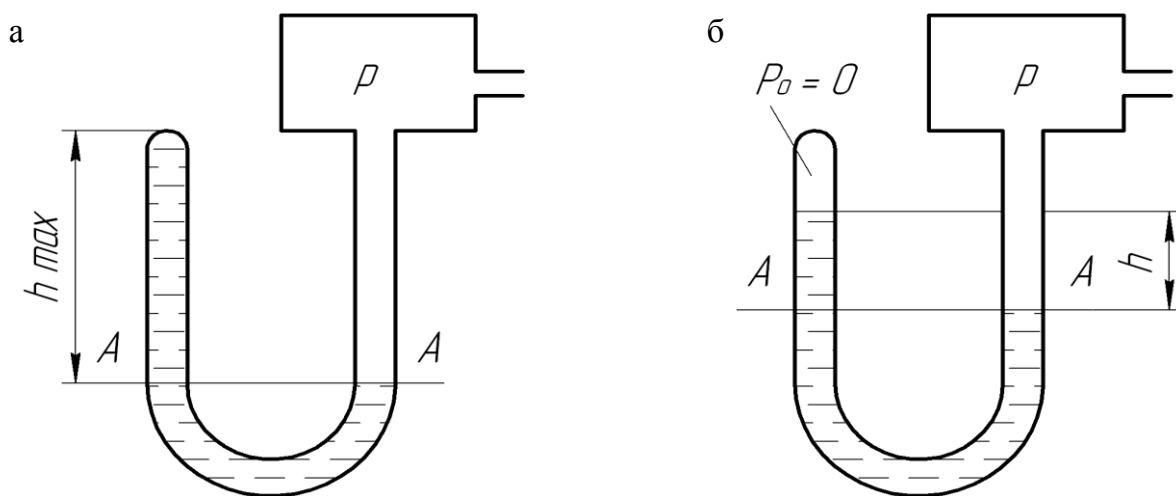


Рис. 3.3. U-образный вакуумметр с закрытым коленом:
а – давление в объекте $p > \rho gh_{\max}$; б – давление в объекте $p < \rho gh_{\max}$

Когда давление в объекте барометрическое ($p = p_0$), жидкость полностью заполняет левое колено (см. рис. 3.3, а). При уменьшении давления в объекте от барометрического до $p = \rho gh_{\max}$ уровень жидкости в коленах не изменяется, но при дальнейшем снижении давления жидкость отрывается от закрытого конца левого колена и её уровень падает (см. рис. 3.3, б). В верхней части закрытого колена возникает так называемая «торричеллиева пустота», давление в которой определяется упругостью пара рабочей жидкости т. е. практически $p_0 = 0$. Поскольку в сечении А–А давление в коленах прибора одинаковое, то можно записать

$$p = \rho gh + p_0$$

или

$$p = \rho gh. \quad (3.2)$$

Таким образом, вакуумметр с закрытым коленом обладает тем преимуществом, что на его показания не влияют колебания атмосферного давления.

В некоторых случаях для повышения более чем на порядок чувствительности вакуумметра ртуть заменяют вакуумным маслом. Однако существенными недостатками масла по сравнению с ртутью являются смачивание им стекла, образование вогнутого мениска и медленное сте-

вание масла по стенкам трубок, что затрудняет считывание показаний прибора. Кроме того, масло достаточно быстро насыщается газами, поэтому требует периодической дегазации путем нагрева под вакуумом.

3.1.2. Компрессионный вакуумметр

Измерить низкое давление порядка 10 Па и ниже U-образным вакуумметром достаточно сложно, но если определенный объем газа при низком давлении сжать, допустим в 1000 или 10000 раз, то давление увеличится во столько же раз и его уже можно будет легко измерить. Такой подход был реализован Мак-Леодом в 1874 г. Предложенный им прибор, названный компрессионным вакуумметром, в усовершенствованном виде широко используется до настоящего времени в качестве образцового для градуировки вакуумметров косвенного метода измерений.

Прибор (рис. 3.4, а) состоит из мерной стеклянной колбы 1 с измерительным капилляром 2, верхний конец которого запаян. Колба сообщается через трубку 3 с объектом 4, в котором необходимо измерить давление, а через трубку 5 и гибкий шланг 6 – с уравнительным сосудом 7 с ртутью. Параллельно с трубкой 3 проходит сравнительный капилляр 8.

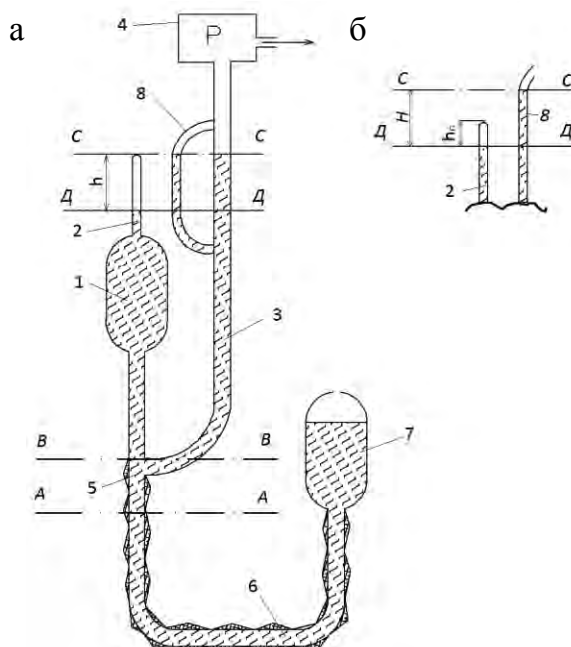


Рис. 3.4. Компрессионный вакуумметр (манометр Мак-Леода) (а, б):
1 – мерная колба; 2 – измерительный капилляр; 3 и 5 – транспортные трубки;
4 – объект, в котором измеряется давление; 6 – гибкий шланг; 7 – уравни-
тельный сосуд; 8 – сравнительный капилляр

Измерение давления прибором осуществляется следующим образом. Опуская уравнильный сосуд 7, снижают уровень ртути до сечения $A-A$. При этом мерная колба 1 сообщается через трубку 3 с объектом и давление в ней становится таким же, что и в объекте. Затем уравнильный сосуд 7 поднимают, доводя уровень ртути в приборе до сечения $B-B$, отсекая при этом мерную колбу от объекта.

Поскольку объем мерной колбы выше сечения $B-B$ заранее измерен, то количество газа в ней известно и равно pV . Далее уровень ртути в сравнительном капилляре 8 поднимают до уровня запаянного конца капилляра 2 (сечение $C-C$). Ртуть, действуя как поршень, вытесняет газ из мерной колбы и сжимает его в капилляре 2, где он занимает объем Fh при давлении $(p + h)$. Измерив перепад уровней ртути в капиллярах h , можно рассчитать искомое давление p в объекте. Согласно закону Бойля–Мариотта,

$$pV = (p + h)Fh,$$

откуда

$$p = \frac{Fh^2}{V - Fh}, \quad (3.3)$$

где p – измеряемое давление в объекте, мм рт.ст.; V – объем мерной колбы выше сечения $B-B$, мм³; h – перепад уровней ртути в капиллярах, мм; F – площадь поперечного сечения капилляров, мм².

Ртуть в сравнительном капилляре 8 можно поднять до любого уровня, например до сечения $C-C$ (см. рис. 3.4, б). Тогда давление газа в капилляре 2 будет $(p + H)$ и уравнение (3.3) примет вид

$$p = \frac{FHh}{V - Fh}. \quad (3.4)$$

Компрессионные вакуумметры обычно применяют для измерения давления в пределах от 10^3 до 10^{-3} Па с погрешностью 2–3 %. Объем мерной колбы может быть 200–500 см³, а диаметр капилляров – примерно 1 мм.

3.1.3. Деформационные вакуумметры

Деформационные вакуумметры измеряют непосредственно силу воздействия газа на чувствительный элемент прибора, поэтому их показания не зависят от рода газа. Различают три основных типа деформационных вакуумметров: трубчатые (трубки Бурдона); мем-

бранные и сильфонные (рис 3.5). Во всех этих приборах происходит деформация чувствительного элемента (трубки, мембраны или сильфона), вызванная разностью между измеряемым и сравнительным (барометрическим) давлениями.

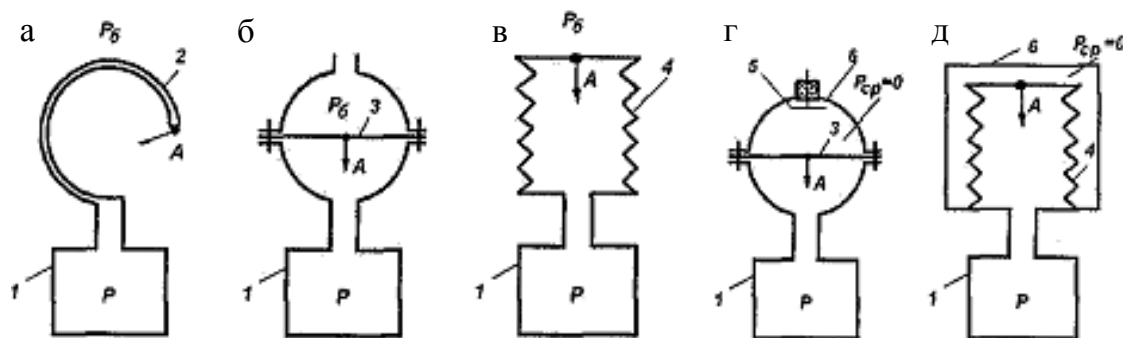


Рис. 3.5. Деформационные вакуумметры:

а – трубчатый; б и г – мембранные; в и д – сильфонные;

1 – объект; 2 – трубка Бурдона; 3 – упругая мембрана; 4 – сильфон; 5 – обкладка конденсатора; 6 – вакуумно-плотный кожух.

Стрелкой указано направление смещения чувствительного элемента (точка А) при вакуумировании объекта 1

Трубчатый вакуумметр (см. рис. 3.5, а) выполняется в виде изогнутой по дуге окружности тонкостенной трубки, имеющей в сечении форму эллипса. Один конец трубки запаян, а другой подсоединяют к объекту 1, в котором необходимо измерить давление. По мере снижения давления p внутри трубки по сравнению с внешним барометрическим давлением $p_б$ уменьшается радиус ее кривизны и запаянный конец трубки (точка А) смещается в направлении, указанном на рисунке. Смещение конца трубки преобразуется с помощью рычажно-зубчатой передачи во вращательное движение оси стрелки.

Трубчатые вакуумметры применяют для измерения низкого вакуума. Их диапазон обычно лежит в пределах от атмосферного до нескольких сотен паскалей. Так, например, образцовый вакуумметр ВО1227, используемый для проверки и калибровки рабочих вакуумметров, имеет шкалу, разбитую на 400 делений. Диапазон измеряемого давления – от 0 до минус 0,1 МПа, а класс точности – 0,25.

Измеряемое трубчатым образцовым вакуумметром давление определяется по формуле

$$p = p_6 \left(1 + \frac{n}{N}\right), \quad (3.5)$$

где p_6 – барометрическое давление в момент измерения, Па; n – отсчет измеряемого давления в делениях шкалы; N – число делений всей шкалы.

В мембранных вакуумметрах (см. рис. 3.5, б и 3.5, г) чувствительным элементом является упругая мембрана. Величина ее прогиба служит мерой измеряемой разности давлений Δp .

В сильфонных вакуумметрах (см. рис. 3.5, в и 3.5, д) в качестве чувствительного элемента используется гофрированная трубка – сильфон. Мерой измеряемой разности давлений Δp в данном случае является величина смещения крышки свободного торца сильфона (точки А).

В приборах (см. рис. 3.5, б и 3.5, в) измеряется разность давлений $\Delta p = p_6 - p \Rightarrow p = p_6 - \Delta p$, поэтому их показания зависят от колебаний атмосферного давления.

В приборах (см. рис. 3.5, г и 3.5, д) в полости под герметичным кожухом *б* высокий вакуум, т. е. можно принять $p_{\text{ср}} = 0$, поэтому разность давлений $\Delta p = p - p_{\text{ср}} \Rightarrow p = \Delta p$. Следовательно, в последнем случае приборы измеряют абсолютное давление в объекте и их показания не зависят от барометрического давления. Применение точных методов измерения величины деформации чувствительных элементов мембранных и сильфонных вакуумметров позволяет расширить диапазон измеряемого ими давления от 10^5 до 10^{-4} Па. Например, как показано на рис. 3.5, г, мембрана служит одной из обкладок плоского конденсатора, емкость которого зависит от величины зазора между мембраной и второй обкладкой *5* и может быть замерена с высокой точностью. В ряде случаев мембрана соединяется с сердечником, перемещающимся в катушке, изменяя при этом ее индуктивность, которую также можно точно измерить.

3.1.4. Тепловые вакуумметры

В основу работы тепловых вакуумметров положена зависимость интенсивности переноса теплоты газом от его давления. В любом преобразователе давления (лампе) теплового вакуумметра чувствительным элементом служит нить накала – проволока, помещенная в колбу. Полость колбы сообщают с объектом, в котором необхо-

димо измерить давление. Через нить накала пропускается электрический ток, в результате чего её температура T_n становится выше температуры стенок колбы T_c . При достижении равновесного состояния мощность тепловыделения нити накала $Q_{эл}$ уравнивается интенсивностью теплосъёма с неё к стенкам колбы за счёт теплоотвода газом Q_g , за счёт потока излучением Q_l и теплопроводности Q_k по элементам конструкции крепления нити накала внутри колбы:

$$Q_{эл} = Q_g + Q_l + Q_k. \quad (3.6)$$

При давлении примерно 1 Па и выше доминирующим является теплосъём газом Q_g . Тепловые потоки Q_l и Q_k напрямую от давления газа не зависят и учитываются при градуировке преобразователя давления. Однако по мере снижения давления ($p < 1$ Па) теплосъём газом Q_g падает настолько на фоне $(Q_l + Q_k)$, что становится трудно точно фиксировать зависимость Q_g от давления. В результате нижний предел давления, измеряемого тепловыми вакуумметрами, обычно составляет 10^{-1} – 10^{-2} Па.

Тепловой поток, отводимый от нити накала газом, определяется по уравнению

$$Q_g = E_k [\lambda_0 F (T_n - T_c) / \delta (1 + 2 \beta Kn)], \quad (3.7)$$

где E_k – коэффициент конвекции; λ_0 – коэффициент теплопроводности газа при атмосферном давлении; F и δ – геометрические характеристики преобразователя давления; β – коэффициент, зависящий от свойств газа и коэффициентов аккомодации при взаимодействии молекул с поверхностями нити и стенки колбы.

Коэффициент конвекции E_k в уравнении (3.7) является функцией критериев Грасгофа и Прандтля. При величине $(Gr \cdot Pr) < 1000$ значение $E_k = 1$. Это означает, что при низких давлениях $p < 10^4$ Па перенос теплоты газом от нити накала к стенке колбы путём конвекции отсутствует и осуществляется только за счёт теплопроводности газа. Когда же давление выше 10^4 Па следует учитывать увеличение теплопередачи газом за счёт возникновения конвекции в полости колбы. При давлении, близком к атмосферному, величина E_k возрастает примерно до 1,5.

В уравнении (3.7) λ_0 , F , δ , β и T_c – величины практически постоянные. Следовательно, тепловой поток Q_g зависит от температуры

нити T_n и величины критерия Кнудсена, т. е., по существу, от давления газа p :

$$Q_\Gamma = C (T_n / Kn) \text{ или } Q_\Gamma = B T_n p, \quad (3.8)$$

где C и B – постоянные.

Уравнение (3.8) показывает, что величину давления газа можно измерить косвенным путём двумя методами. Первый метод заключается в том, чтобы удерживать $Q_{эл}$, а следовательно, и Q_Γ постоянными. Тогда снижение давления газа будет вести к росту термического сопротивления теплопереносу газом. В результате этого повысится температура нити, компенсируя увеличение термического сопротивления путём роста разности температур ($T_n - T_c$). Измеряя температуру нити накала, можно судить о величине давления газа. Этот принцип положен в основу работы термопарного вакуумметра.

Во втором методе поддерживают постоянной температуру нити накала T_n , регулируя мощность $Q_{эл}$ и, соответственно, Q_Γ , поскольку при $T_n = \text{const}$ $Q_\Gamma = \text{const}$ и $Q_k = \text{const}$. Снижение давления газа требует синхронного снижения мощности тепловыделения нити накала $Q_{эл}$, чтобы выполнялось условие $T_n = \text{const}$. В результате измерение $Q_{эл}$ даёт возможность определять давление газа. На этом принципе основана работа вакуумметров сопротивления.

Термопарный вакуумметр (рис. 3.6) включает преобразователь монотрический термопарный (ПМТ) и вторичный прибор. Преобразователь (лампа) представляет собой стеклянную или металлическую колбу 1, внутри которой на двух вводах закреплена платиновая или никелевая нить накала 2, а на двух других вводах крепится термопара 3, изготовленная из хромель-копеля или хромель-алюмеля. Термопара предназначена для измерения температуры нити накала. При постоянном токе температура нити меняется с изменением давления. Снижение давления ухудшает теплосъём с нити газом, что компенсируется повышением её температуры и, соответственно, наоборот, измеряя термопарой температуру нити (измеряя ЭДС), можно судить о величине давления.

Термопарные вакуумметры позволяют измерять давление в диапазоне от 10^{-1} до 10^2 Па с погрешностью ± 15 %. Нижний предел измеряемого давления ограничивается тем, что при малых значениях давления достигается состояние, когда отвод теплоты от нити накала газом становится гораздо меньше отвода излучением и по

конструктивным элементам вводов $Q_{\Gamma} \ll Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}}$. Температура нити при этом постоянна, не зависит от давления и определяется только потерями теплоты за счёт $Q_{\text{л}}$ и $Q_{\text{к}}$. Верхний предел определяется, во-первых, тем, что в плотном газе теплопроводность перестаёт зависеть от давления. Во-вторых, из-за интенсивного отвода теплоты от нити газом снижается разность температур $T_{\text{н}} - T_{\text{с}}$, что приводит к потере чувствительности прибора. Увеличив ток накала, можно измерять давление до 100 Па, но при этом датчик должен располагаться вертикально цоколем вверх.

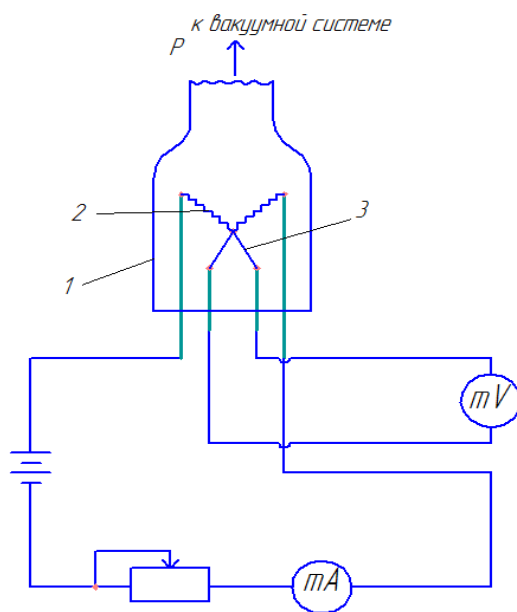


Рис. 3.6. Схема термопарного вакуумметра:
1 – колба; 2 – нить накала; 3 – термопара

Показания тепловых вакуумметров зависят от рода газа. Обычно датчики градуируются по азоту (рис. 3.7). При измерении давления других газов, имеющих иную теплопроводность, это следует учитывать путём применения поправочного коэффициента относительной чувствительности:

$$p_{\Gamma} = C p_a, \quad (3.9)$$

где p_{Γ} – давление газа в объекте; p_a – давление, измеренное датчиком, отградуированным по азоту; C – коэффициент относительной чувствительности теплового вакуумметра (табл. 3.2).

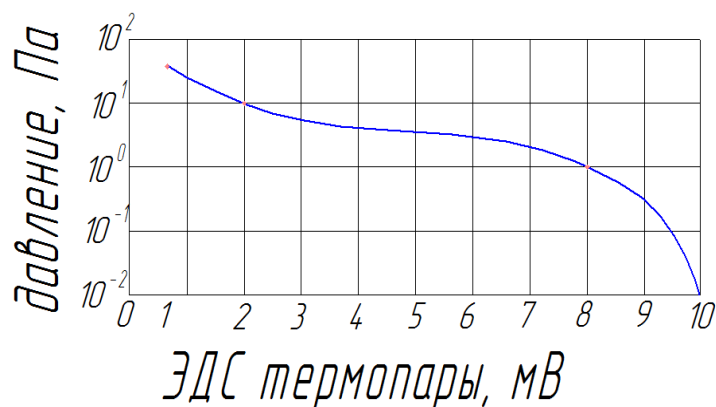


Рис. 3.7. Образец градуировочной кривой термопарного вакуумметра

Таблица 3.2

Коэффициенты относительной чувствительности тепловых вакуумметрических преобразователей по разным газам

Газ	Воздух	N ₂	H ₂	He	Ne	Ar	CO ₂	CH ₄
<i>C</i>	1,0	1,0	0,67	1,12	1,31	1,65	0,97	0,61

Вакуумметр сопротивления (рис. 3.8), работающий в режиме постоянной температуры, состоит из манометрического преобразователя и измерительного блока. Преобразователь представляет собой трубку из коррозионно-стойкой стали 1, внутри которой натянута вольфрамовая нить накала 2. При работе вакуумметра температура нити T_n поддерживается постоянной (примерно 220 °С). Мерой давления является ток нагрева, напряжение или электрическая мощность, подводимая к нити. Условие $T_n = \text{const}$ означает одновременно условие $R_1 = \text{const}$, что реализуется при помощи мостовой схемы, которая обеспечивает $I_r = 0$ для измеряемого давления. Изменение давления приводит к изменению температуры нити накала и ее сопротивления R_1 , а это вызывает разбалансировку мостовой схемы. Регулируя реостатом 3 питающее напряжение, изменяют ток накала и возвращают температуру нити к исходному значению. Судят о давлении по силе тока, который измеряют миллиамперметром 5, или по величине напряжения (милливольтметром 6).

Диапазон давлений, измеряемых вакуумметрами сопротивления, лежит в пределах от 10^0 до 10^3 Па. Разновидностью данных датчиков являются конвекционные преобразователи, в которых эффек-

тивно используется конвективный механизм теплопередачи. Из-за особенностей механизма теплопереноса данные датчики рекомендуются устанавливать в вертикальном положении фланцем вниз. Пространство вокруг нити накала увеличено, что обеспечивает образование восходящих и нисходящих потоков газа и лучшее охлаждение нити. Это, в свою очередь, повышает точность прибора и расширяет диапазон измеряемых давлений от 10^{-2} до 10^5 Па.

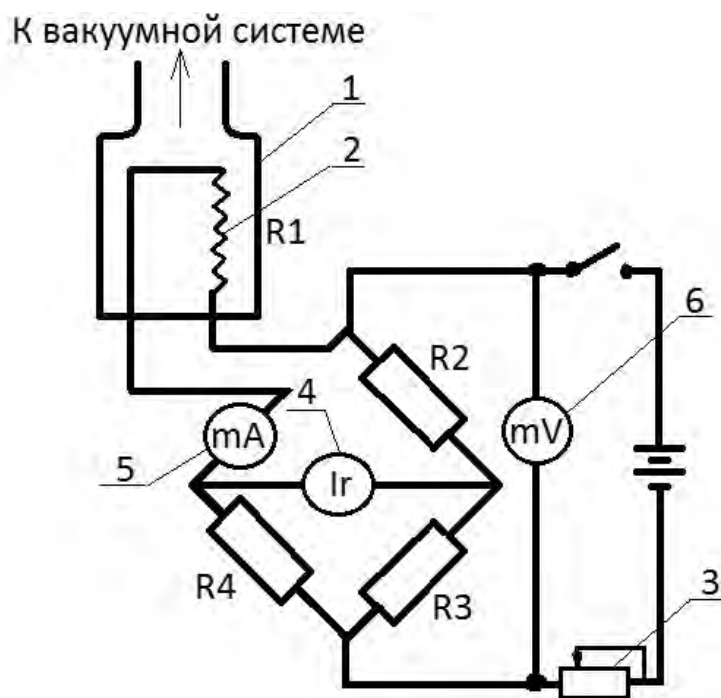


Рис. 3.8. Схема вакуумметра сопротивления:
 1 – корпус датчика давления; 2 – нить накала;
 3 – реостат; 4 – гальванометр; 5 – миллиамперметр;
 6 – милливольтметр

Особенности тепловых вакуумметров. Тепловые вакуумметры не относятся к прецизионным приборам из-за неопределённости коэффициентов аккомодации при соударениях молекул газа с поверхностями нити и стенками колбы, а также вследствие невозможности точной оценки степени черноты нити накала. На их показания значительное влияние оказывают загрязнение нити и колебания температуры стенок колбы. Кроме того, они обладают существенной инерционностью, достигающей 2–4 с, и как приборы косвенного действия нуждаются в градуировке. Однако тепловые вакуумметры имеют простую и надежную конструкцию, способны измерять давление всех газов и паров и не боятся прорывов атмосферы.

3.1.5. Ионизационные вакуумметры

Принцип действия ионизационных вакуумметров основан на зависимости тока положительных ионов, образующихся при ионизации молекул разреженного газа, от измеряемого давления. По способу ионизации вакуумметры делятся на три типа:

- электронные с ударной ионизацией, в которых ускоренные электрическим полем свободные электроны выбивают с внешних орбит молекул электроны, превращая нейтральные молекулы в положительные ионы;
- радиоизотопные, в которых для ионизации газа применяют излучение радиоактивных материалов;
- магнитные электроразрядные с холодными электродами и самостоятельным разрядом в магнитном поле.

Чувствительность ионизационных вакуумметров всех трёх типов зависит от рода газа, давление которого измеряется.

Электронный ионизационный вакуумметр

Типовой преобразователь давления (лампа ПМИ-2) получил широкое распространение для измерения давления от 10^{-1} до 10^{-5} Па (рис. 3.9). Катод прямого накала *1* в форме шпильки из вольфрамовой проволоки служит источником электронов. Испускаемые катодом электроны ускоряются под действием электрического поля, создаваемого положительно заряженной сеткой *2*, выполненной в виде цилиндрической спирали. Ввиду большого шага витков сетки значительная часть электронов пролетает за сетку. В пространстве между сеткой и коллектором ионов *3* происходит в основном ионизация газа электронами. Отталкиваемые полем отрицательно заряженного коллектора электроны вновь возвращаются к сетке. В результате вокруг анодной сетки непрерывно колеблются электроны, а попав в витки, создают в её цепи сеточный ток I_c .

Образующиеся положительные ионы притягиваются к отрицательно заряженному коллектору, воспринимают от него недостающий электрон и вновь становятся нейтральными молекулами. В результате отбора с коллектора электронов в его цепи возникает ионный ток $I_{и}$, который служит мерой измеряемой концентрации молекул *n* (давления газа). Поскольку величина ионного тока зависит не

только от концентрации молекул газа, но и от количества электронов, участвующих в процессе ионизации, то $I_{\text{и}} = f(n, I_{\text{с}})$. Для однозначной зависимости $I_{\text{и}}$ от n сеточный ток фиксируют ($I_{\text{с}} = \text{const}$).

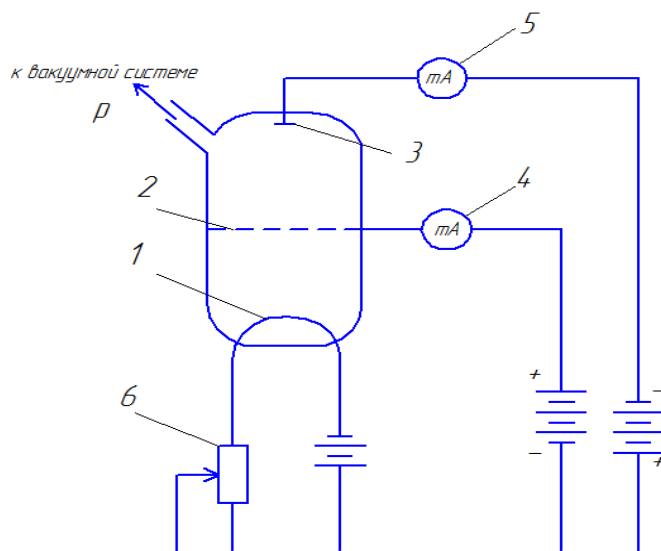


Рис. 3.9. Электронный ионизационный вакуумметр:

1 – катод; 2 – анодная сетка; 3 – коллектор ионов; 4 – измеритель сеточного тока $I_{\text{с}}$;
5 – измеритель ионного тока $I_{\text{и}}$; 6 – реостат

Электронные ионизационные датчики обладают откачивающим действием. Некоторое количество газа хемосорбирует на горячем катоде (особенно кислород), а другая часть откачивается в результате внедрения ионов в электроды датчика. Например, для лампы ПМИ-2 быстрота ионной откачки составляет примерно 0,01 л/с.

Верхний предел измеряемого давления типовым датчиком составляет примерно 10^{-1} Па. При более высоких значениях давления есть опасность окисления (сгорания) катода. Кроме того, из-за малой длины свободного пробега электронов в плотном газе они не успевают ускориться и приобрести достаточную энергию для ионизации молекул.

Нижний предел вакуумметра обусловлен фоновой составляющей тока коллектора, не зависящей от давления. Электроны при торможении на сетке дают мягкое рентгеновское излучение, которое, попадая на коллектор, вызывает фотоэмиссию (вылет с него электронов). При давлении газа менее 10^{-5} Па ток фотоэмиссии $I_{\text{ф}}$ может ока-

заться доминирующим по сравнению с ионным током $I_{\phi} \gg I_{и}$, тогда показания прибора перестают зависеть от давления газа. Для измерения сверхвысокого вакуума применяют датчики с обращенным расположением электродов.

Поскольку электронный ионизационный вакуумметр является прибором косвенного измерения давления газа, он нуждается в градуировке. Градуировка производится путем сравнения показаний прибора с показаниями компрессионного эталонного вакуумметра.

Датчики электронного ионизационного вакуумметра градуируются по азоту (воздуху). Для измерения давления других газов требуется градуировка по конкретному газу или, для технических измерений, пересчет по формуле (3.9). Коэффициенты относительной чувствительности для ряда газов приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Коэффициенты относительной чувствительности электронных ионизационных вакуумметров [2]

Газ	N ₂	Воздух	H ₂	He	Ar	O ₂	CO ₂	H ₂ O
C	1,0	1,0	2,18	5,3	0,73	1,15	0,62	0,91

Магнитные электроразрядные вакуумметры

В магнитном электроразрядном вакуумметре используется зависимость тока электрического разряда в магнитном поле от концентрации газа, а следовательно, и от его давления. Преобразователь вакуумметра (рис 3.10) состоит из двух плоскопараллельных катодных пластин К и помещенного между ними анода А в виде проволочного кольца, плоскость которого параллельна катодным пластинам. Направление силовых линий магнитного поля перпендикулярно плоскостям анода и катодов. Между электродами приложено напряжение 2–3 кВ через балластное сопротивление R .

Свободные электроны, всегда имеющиеся в газе, притягиваются к аноду, но магнитное поле вынуждает их двигаться по спирали, преодолевая большие расстояния, прежде чем они достигают анода. Сталкиваясь с молекулами газа, электроны ионизируют часть из них, выбивая из молекул электроны, которые также участвуют в процессе ионизации газа. Величина тока разряда измеряется миллиампермет-

ром и служит мерой давления. Таким образом, совместное действие электрического и магнитного полей многократно удлиняет траекторию электронов и увеличивает вероятность ионизации газа даже при достаточно низком давлении.

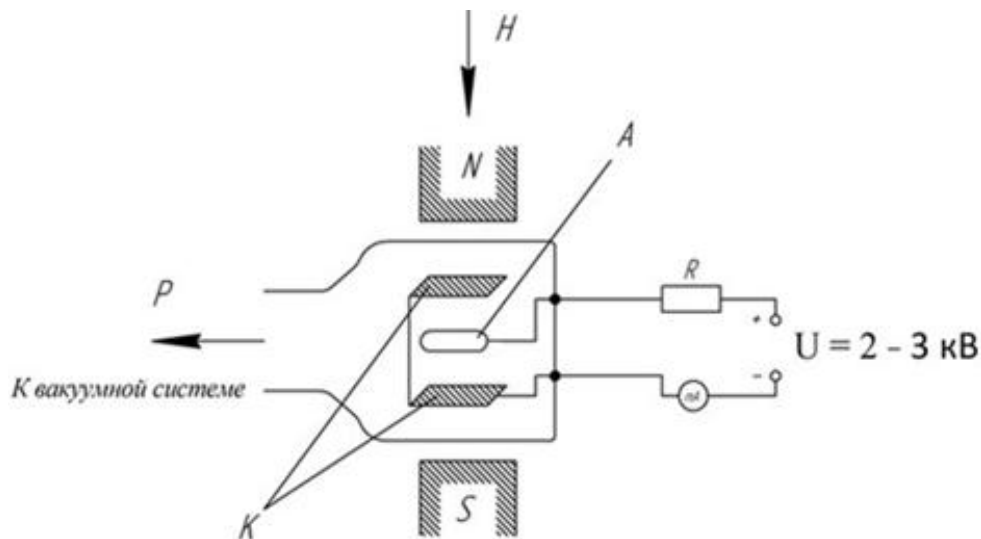


Рис. 3.10. Схема магнитного электроразрядного вакуумметра:
 p – давление измеряемого газа; N и S – полюса магнита;
 A – анод; K – катод; H – напряженность магнитного поля

Магнитные электроразрядные вакуумметры способны измерять давление в широком диапазоне от 10^2 до 10^{-10} Па

Радиоизотопный вакуумметр

Радиоизотопный вакуумметр (рис. 3.11) работает по принципу измерения электропроводности исследуемого газа, ионизированного α -излучением радия или плутония. Внутри камеры датчика 1 расположен цилиндрический анод 2, на внутреннюю поверхность которого нанесена гидроокись радиоактивного плутония 3. В центре анода размещен стержневой коллектор ионов 4.

Молекулы остаточного газа ионизируются α -частицами, испускаемыми радиоактивным изотопом. Образующиеся положительные ионы под действием разности потенциалов между анодом и коллектором направляются к коллектору, вызывая в цепи ионный ток. Поскольку скорость образования α -частиц постоянна, то число ионизированных молекул любого газа, поступающих на коллектор в единицу

времени, пропорционально концентрации (давлению) этого газа. Таким образом, по силе ионного тока можно судить о давлении газа.

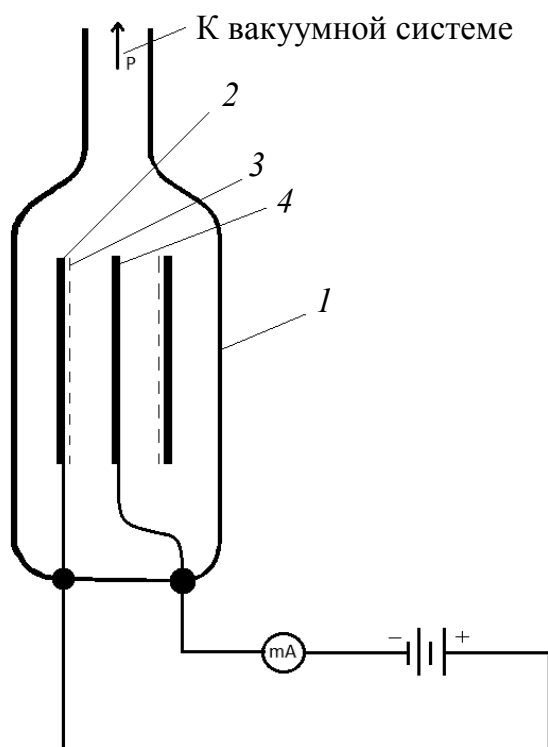


Рис. 3.11. Схема радиоизотопного вакуумметра:
 1 – камера датчика; 2 – анод;
 3 – слой гидроокиси плутония; 4 – коллектор ионов

Различные модели радиоизотопных вакуумметров перекрывают диапазон измеряемого давления от атомного до 10^{-2} Па и ниже. Поскольку разные газы неодинаково поддаются ионизации, то данные вакуумметры требуют отдельной градуировки для каждого газа. Однако в условиях промышленного использования эти различия часто не принимают во внимание или производят пересчет измеряемого давления под конкретный газ, используя коэффициенты относительной чувствительности.

3.1.6. Специфика измерения вакуума в криогенных объектах

Явление тепловой транспирации имеет важное значение при измерении давления в криовакуумных системах, когда манометр,

находящийся при комнатной температуре, соединен с исследуемым объектом узким каналом; объем объекта имеет температуру, отличную от комнатной. На рис. 3.12 показана типичная для криовакуумной системы ситуация.

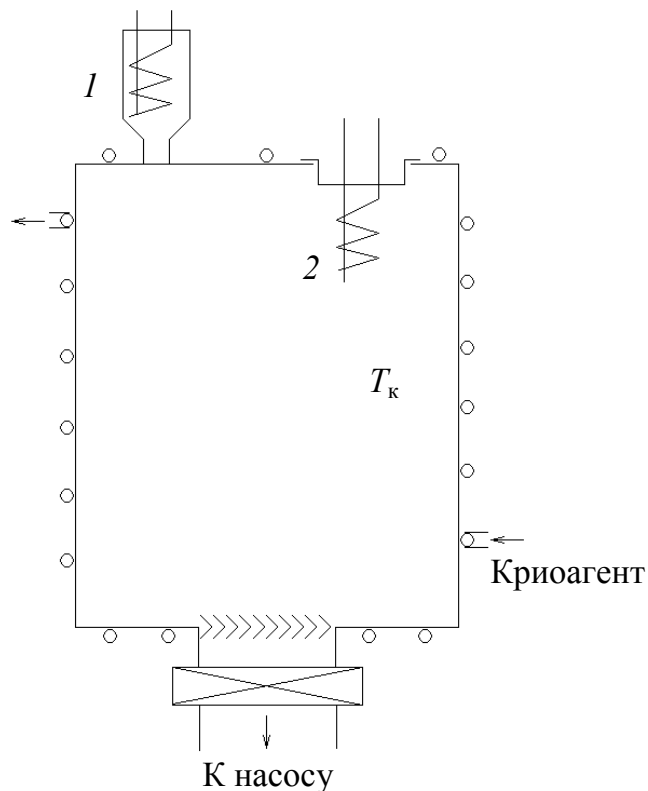


Рис. 3.12. К вопросу измерения вакуума в криогенных системах:
1 – внешний датчик; 2 – встроенный открытый датчик

В камере с охлажденными стенками вакуум измеряется с помощью внешнего датчика 1 и встроенного открытого датчика 2. Объемом колбы датчика 1 можно пренебречь. Когда стенки камеры не охлаждаются и температура колбы датчика 1 T_1 равна температуре стенок камеры T_k , концентрация молекул имеет равномерное распределение по всей системе $n_1 = n_k$. Если бы не было сорбционно-десорбционных явлений, то давление в колбе датчика и в камере были бы равны $p_1 = p_k$, поскольку $p_1 = n_1 k T_1$, а $p_k = n_k k T_k$. Это означает, что показания внешнего и встроенного датчиков должны совпадать. Как изменятся концентрация молекул и давление в колбе датчика 1 и в камере, если стенки камеры охладить до температуры, например, $T'_k = 77$ К, а температуру стенок колбы датчика оставить прежней, пусть $T_1 = 300$ К? В соответствии с явлением тепловой транспирации

часть молекул газа перейдет из колбы I в камеру, но поскольку объем последней значительно превышает объем колбы, то концентрация молекул в камере практически не изменится ($n'_k = n_k$). В колбе же датчика концентрация будет равна

$$n'_1 = n_k \sqrt{\frac{T'_k}{T_1}} = n_k \sqrt{\frac{77}{300}} \approx 0,5 n_k = 0,5 n_1.$$

Давление газа в колбе

$$p'_1 = n'_1 k T_1 = 0,5 n_1 k T_1 = 0,5 p_1.$$

Давление в камере

$$p'_k = n'_k k T'_k = n_k k T_k \frac{T'_k}{T_k} = n_k k T_k \frac{77}{300} \approx 0,25 p_k.$$

Следовательно, при охлаждении стенок камеры жидким азотом до температуры 77 К концентрация и давление газа в колбе датчика снизятся в два раза, в то время как концентрация молекул газа в камере останется неизменной, а давление снизится в четыре раза.

Таким образом, если датчики измеряют концентрацию молекул (ионизационные манометры), то внешний прибор снизит свои показания вдвое, а показания встроенного не изменятся. Чтобы по внешнему манометру определить истинную концентрацию молекул в камере, необходимо его показания удвоить, а если требуется найти давление в камере, то его показания надо уменьшить в два раза. Встроенный датчик показывает истинную концентрацию, а давление завышает в четыре раза.

Приведенные рассуждения справедливы для случая, когда колба датчика и камера сообщаются друг с другом трубкой, диаметр которой d мал по сравнению со средней длиной свободного пути молекул l . Если же l гораздо меньше d , так что столкновения между молекулами происходят значительно чаще, чем столкновения молекул со стенками, то условием равновесия является равенство давлений в колбе и камере независимо от их температуры $p_1 = p_k$. Следствием этого будет соотношение $\frac{n_1}{n_k} = \frac{T_k}{T_1}$.

Таким образом, существует интервал давлений, в котором отношение давлений $\frac{p_k}{p_1}$ меняется от 1 до $\sqrt{\frac{T_k}{T_1}}$. Чем меньше диаметр

трубки, соединяющей датчик с камерой, тем выше давление, при котором справедливо соотношение $\frac{p_k}{p_1} = \sqrt{\frac{T_k}{T_1}}$.

3.2. Масс-спектрометры

3.2.1. Классификация масс-спектрометров

Различные технологические процессы, осуществляемые в условиях вакуума, требуют определённого состава остаточного газа. В этой связи необходимо определять не только полное давление, но и состав газа, а при необходимости – регулировать его.

Наиболее наглядную картину состава газа в вакуумируемом объекте даёт линейчатый спектр парциальных давлений, пример которого представлен на рис. 3.13. По оси абсцисс отложено массовое число: отношение молекулярной массы в атомных единицах к заряду иона $\mu = \frac{M}{e}$. Поскольку число однозарядных ионов обычно доминирует, то часто считают $\mu = M$. По оси ординат отложена сила тока выходного сигнала, пропорциональная парциальному давлению отдельных составляющих газовой смеси. Положение пиков на оси абсцисс определяет род газа. Приборы, служащие для получения спектров отдельных масс, называются газоанализаторами или масс-спектрометрами.

Датчик масс-спектрометрического прибора состоит из трёх основных узлов: источника ионов, сепаратора и приёмника ионов (коллектора).

Анализируемый газ, попадая в камеру источника ионов, ионизируется в ней путём бомбардирования молекул электронами. Образующиеся положительные ионы формируются в пучок, ускоряются и выталкиваются в сепаратор. Ионы входят в сепаратор с разными скоростями в зависимости от их массового числа. В сепараторе ионы разделяются. Причём в зависимости от используемого способа разделения ионов масс-спектрометры подразделяются на три большие группы:

- статические масс-спектрометры, в которых разделение ионов осуществляется с помощью отклонения ионного луча магнитным полем. Кривизна траектории полёта отдельных ионов зависит от их массового числа;

- времяпролётные масс-спектрометры, основанные на различии времени, необходимого для пролёта ионами с разными массовыми числами одного и того же определённого пути;
- радиочастотные масс-спектрометры, в которых используется различие резонансных частот ионов, обладающих разными массами.

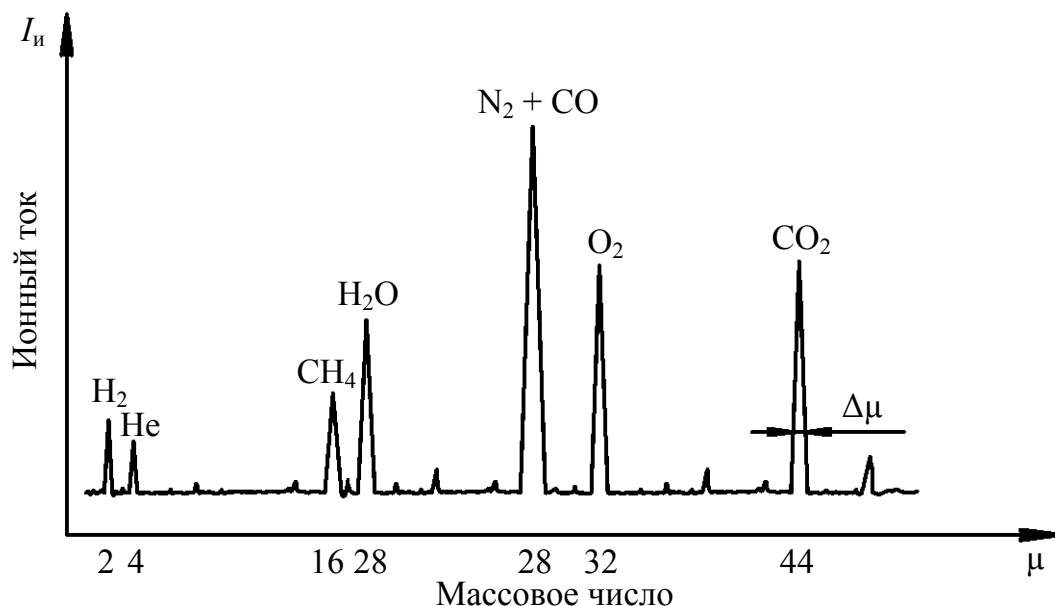


Рис. 3.13. Масс-спектрограмма

Потоки ионов определённого узкого спектра масс, выделенных в сепараторе, доходят поочерёдно до коллектора, возбуждая в нем импульсы ионного тока, которые регистрируются и служат для оценки парциального давления той или иной составляющей исследуемой газовой смеси. Масс-спектрометры характеризуются рядом параметров, важнейшие из которых следующие:

- чувствительность – минимально определяемое парциальное давление (минимальный пик, заметный на масс-спектрограмме);
- разрешающая способность – представляет отношение массового числа μ к наименьшему различаемому изменению массового числа $\Delta\mu$: $\rho = \frac{\mu}{\Delta\mu}$. Для технических вакуумных измерений применяются газоанализаторы с разрешающей способностью до 50;
- диапазон анализируемых масс для проведения вакуумных измерений от 2 до 100.

Расшифровка масс-спектрограмм достаточно сложна. Это обусловлено рядом обстоятельств, например появлением двухзарядных ионов, массовое число которых вдвое меньше их молекулярной массы. В результате на спектрограмме появляются два пика у одного и того же газа. Кроме того, электронный луч и накали́нный катод могут производить диссоциацию сложных молекул газа на ряд более простых составляющих, которые дают в спектре соответствующие пики ионов. Так, диссоциированные молекулы CO_2 могут дать пики, соответствующие CO^+ , C^+ , O^+ , O_2^+ . Пик с одним и тем же массовым числом может принадлежать разным веществам. Метан CH_4^+ и атомарный кислород O^+ имеют одинаковое массовое число 16, а азот N_2^+ и окись углерода CO^+ имеют массовое число 28 и т. д.

Для правильной расшифровки спектрограмм необходима тщательная калибровка газоанализаторов по эталонным газовым смесям и отдельным газам. Все масс-спектрометры могут работать и как электронные ионизационные вакуумметры, только при давлении не выше 10^{-1} Па.

3.2.2. Статический масс-спектрометр

Схема статического масс-спектрометра с разделением ионов в магнитном поле показана на рис. 3.14.

К камере 1, состав газа в которой необходимо определить, подсоединяется преобразователь масс-спектрометра. В преобразователе ионизация газа осуществляется пучком электронов, эмитируемых горячим катодом 2 и ускоряемых анодом 3. Образующиеся положительные ионы вытягиваются из ионизатора И в сепаратор С через узкую щель 4, ускоряются и дополнительно фокусируются в узкий пучок полем электрических линз 5. Попадая в зону действия магнитного поля магнита 6, пучок ионов расщепляется на отдельные пучки, соответствующие разным молекулярным массам. Радиус траектории ионов, движущихся в однородном магнитном поле с индукцией B ,

$$r = \frac{\alpha}{B} \sqrt{\mu U}, \quad (3.10)$$

где α – коэффициент пропорциональности; μ – массовое число иона; U – ускоряющее напряжение; B – индукция магнитного поля.

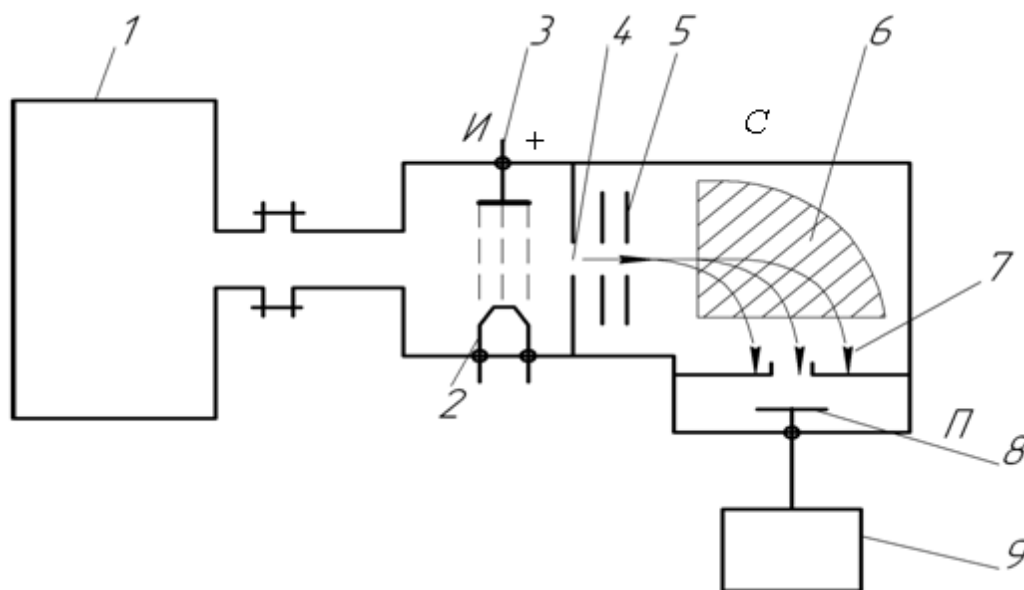


Рис. 3.14. Принципиальная схема статического масс-спектрометра:

1 – объект исследования; 2 – катод; 3 – анод; 4 – выходная щель;
 5 – электрическая линза; 6 – магнит; 7 – входная щель; 8 – коллектор ионов;
 9 – усилитель и измеритель ионного тока;
 И – секция ионизации газа; С – секция сепарации ионов; П – приёмник ионов

Изменяя ускоряющее напряжение или индукцию магнитного поля, можно последовательно направлять во входную щель 7 приёмника ионы разных масс. Попадая на коллектор 8, пучки ионов вызывают в нём импульсы тока, которые усиливаются и регистрируются во вторичном устройстве 9 в виде масс-спектрограммы.

3.2.3. Времяпролётный масс-спектрометр

Работа времяпролётного масс-спектрометра (рис. 3.15) основана на разделении ионов по времени пролёта расстояния ℓ от источника ионов до коллектора. Источник ионов выдаёт в сепаратор (пространство дрейфа) пакеты ионов. Пакет ионов можно получить как импульсной ионизацией электронным потоком длительностью примерно 10^{-6} с, так и подачей на вытягивающую сетку 4 импульса напряжения той же длительности при постоянном электронном потоке. Ускоряющее напряжение U , подаваемое на сетку 5, сообщает ионам импульс в сторону коллектора. В сепараторе ионы движутся по инерции, при этом скорость движения отдельных ионов зависит от их массового числа.

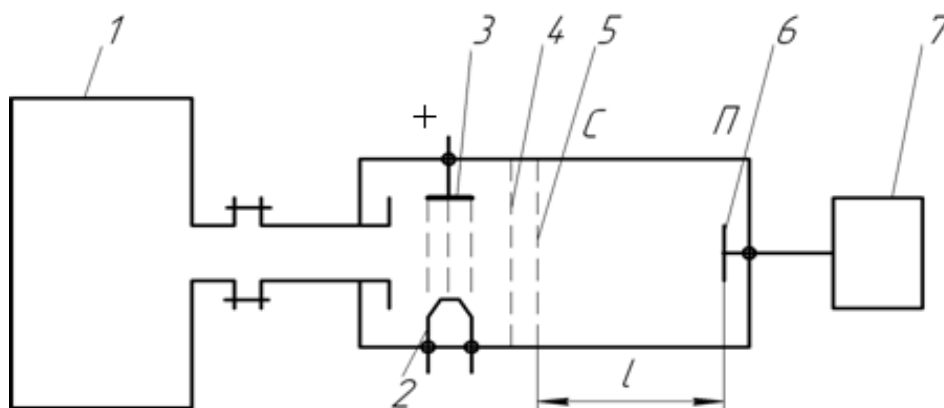


Рис. 3.15. Принципиальная схема времяпролётного масс-спектрометра:

1 – объект исследования; 2 – катод; 3 – анод; 4 – вытягивающая сетка; 5 – ускоряющая сетка; 6 – коллектор ионов; 7 – усилитель и измеритель ионного тока; И – секция источника ионов; С – секция сепарации ионов; П – приёмник ионов

Время пролета ионами расстояния ℓ определяется уравнением

$$\mathcal{T} = \ell \sqrt{\frac{\mu}{2U}}, \quad (3.11)$$

Следовательно, первыми достигнут коллектора легкие ионы, а за ними последовательно группы более тяжёлых ионов. Попадая на коллектор 6 группы ионов создают в его цепи ток, пропорциональный количеству ионов в группе, т. е. парциальному давлению того или иного газа. Усиленный сигнал подаётся на осциллограф, частота развёртки которого синхронна с частотой повторения ионизирующих импульсов. В результате на экране получают масс-спектрограмму анализируемой газовой смеси.

4. ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ

Вакуумными насосами называют устройства, служащие для удаления газов и паров различных веществ из откачиваемых объектов. По назначению насосы подразделяются на высоковакуумные – $10^{-1} - 10^{-10}$ Па, насосы среднего вакуума – $10^2 - 0,1$ Па и насосы низкого вакуума – $10^5 - 10^2$ Па.

Все вакуумные насосы можно разделить на две основные группы:

- насосы проточного типа, которые сжимают газ и удаляют его из откачиваемого пространства наружу;
- сорбционные насосы, в которых газ поглощается в самом насосе.

В насосах проточного типа сжатие газа может осуществляться либо за счет изменения объема газа, либо путем передачи газу импульса от быстро движущихся поверхностей (роторов или турбин) или высокоскоростных струй газа, пара или жидкости.

Работа сорбционных насосов основана на физико-химических способах связывания газов путем десублимации на криогенных поверхностях, путем адсорбции охлажденными высокопористыми веществами (адсорбентами) и путем химических реакций газов с активными металлами и образованием нелетучих соединений.

В ГОСТ 5197–70 «Вакуумная техника. Термины и определения» [3] основные параметры вакуумных насосов трактуются следующим образом:

1. Быстрота действия вакуумного насоса – это объем газа при давлении у входного патрубка, удаляемый насосом в единицу времени:

$$S_H = \frac{dV}{d\tau}. \quad (4.1)$$

2. Производительность вакуумного насоса – это поток газа, проходящий через его входное сечение:

$$Q = S_H p_{вх}. \quad (4.2)$$

3. Предельное давление насоса $p_{пр}$ – это минимальное давление, которое может обеспечить насос, работая без откачиваемого объекта. Быстрота действия насоса при приближении к предельному давлению стремится к нулю. Предельное давление большинства вакуумных насосов определяется газовойделением материалов, из кото-

рых изготовлен насос, перетеканием газов через зазоры и другими явлениями, возникающими в процессе откачки.

4. Давление запуска вакуумного насоса $p_з$ – это максимальное давление во входном сечении насоса, при котором он может начать работу.

5. Наибольшее выпускное давление $p_в$ – это максимальное давление в выходном сечении насоса, при котором он может осуществлять откачку. Этот параметр не используется для некоторых типов сорбционных насосов, поглощающих газ в объеме насоса.

Научные исследования и промышленность требуют достижения вакуума в широком диапазоне от 10^5 до 10^{-10} Па и ниже, предъявляя при этом различные требования и ограничения. Это побудило к разработке огромного количества средств создания вакуума, удовлетворяющих тем или иным требованиям. Далее будет рассмотрена лишь малая часть вакуумных насосов, наиболее широко используемых на практике.

4.1. Механические вакуумные насосы

4.1.1. Ротационные вакуумные насосы с масляным уплотнением

Наиболее распространенными насосами для получения низкого и среднего вакуума (10^5 – 10^{-1} Па) являются ротационные насосы с масляным уплотнением. Они относятся к насосам объемного действия, поскольку работают за счет периодического изменения объема рабочей камеры.

Пластинчато-роторный насос показан на рис. 4.1. В цилиндрической полости статора 1 вращается эксцентрично расположенный ротор 2, в прорези которого свободно скользят пластины 6 и 7, распираемые пружиной 8. При вращении ротора центробежные силы также прижимают пластины к внутренней поверхности статора и они скользят по ней.

Пластины и ротор делят полость статора на области 3, 4 и 5. Область 3 соединяется с впускным патрубком, имеющим сетчатый фильтр 11. Область 5 связана с выпускным клапаном 9, а область 4 ограничена двумя пластинами.

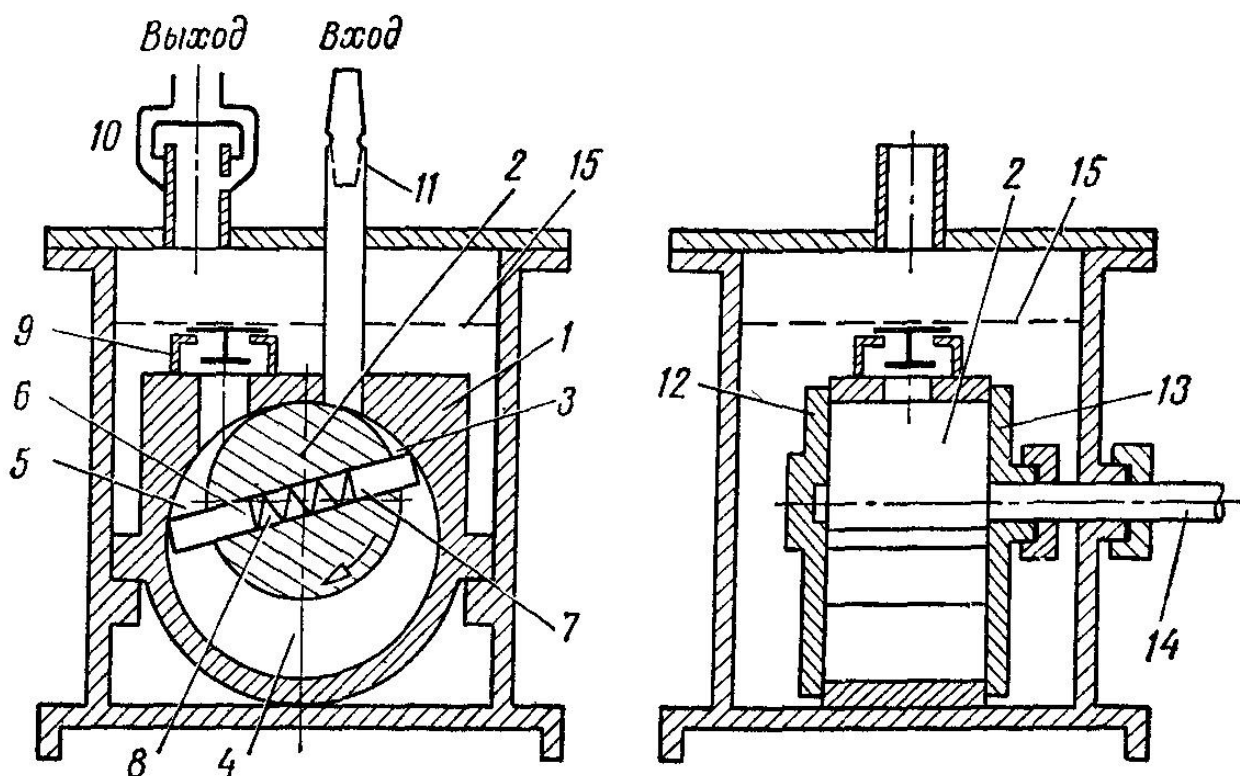


Рис. 4.1. Масляный ротационный насос с золотниками в роторе:

1 – статор; 2 – ротор; 3, 4, 5 – части камеры; 6, 7 – золотники; 8 – пружина;
9 – обратный клапан; 10 – маслоуловитель; 11 – фильтр; 12, 13 – боковые крышки;
14 – ось; 15 – уровень масла

Область 3 при вращении ротора увеличивает свой объем, в нее поступает газ из впускного патрубка, связанного с откачиваемым объектом. Газ в области 4 перемещается от входа к выходу. Область 5 уменьшается в объеме, газ в ней сжимается и выталкивается через клапан 9 во внешний корпус насоса, заполненный вакуумным маслом. Далее газ проходит маслоуловитель 10 и выбрасывается в атмосферу. Таким образом, в насосе осуществляется перенос газа из откачиваемого объекта в атмосферу.

Масло, находящееся в корпусе насоса, проникает по сверлениям в статор, смазывает трущиеся детали, уплотняет зазоры в роторном механизме, благодаря чему уменьшается обратное перетекание газа с выходной области 5 во входную область 3. Избыток масла выталкивается вслед за газом через клапан 9 вновь в масляную ванну корпуса.

В пластинчато-статорном насосе (рис. 4.2) цилиндрический ротор 1 расположен с некоторым эксцентриситетом в цилиндре статора 3. При вращении вала 2 ротор постоянно соприкасается с поверхностью статора. Пластина 7, совершая возвратно-поступательные движения в щели статора, постоянно прижимается пружиной к поверхности ротора. Таким образом, свободная полость статора делится пластиной на две области 4 и 5. При вращении ротора газ из откачиваемого объекта поступает через входной патрубок в увеличивающуюся в объеме полость 5. В это же время газ в полости 4 сжимается и выталкивается через клапаны 6 в атмосферу. За два оборота ротора порция газа, поступившая из откачиваемого объекта, перемещается в насосе от впускного патрубка к выпускному клапану, сжимается в полости 4 и выталкивается из насоса.

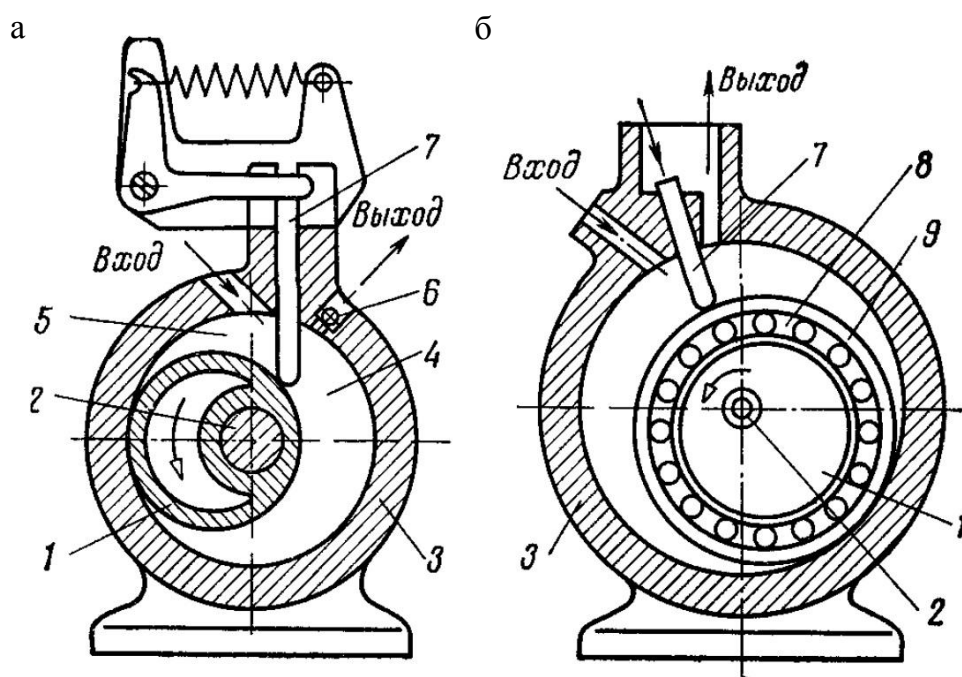


Рис. 4.2. Ротационный масляный насос с золотником в статоре:
а – золотник скользит по эксцентрической поверхности ротора;
б – золотник упирается в цилиндрическое кольцо, катящееся по эксцентрику ротора;
1 – эксцентрический ротор; 2 – ось; 3 – статор; 4, 5 – области насосной камеры;
6 – шариковый обратный клапан; 7 – золотник; 8 – обойма;
9 – цилиндр эксцентрика

На рис. 4.3 схематично изображен плунжерный (золотниковый) насос. В цилиндрическом корпусе вращается эксцентрический ротор 2. Шарнирный золотник 1 (прямоугольной формы) жестко со-

единен с цилиндром ротора. Золотник имеет клапан 3, через который газ из откачиваемого объекта поступает в рабочую камеру. При повороте плоской части золотника шарнир свободно поворачивается в гнезде корпуса насоса.

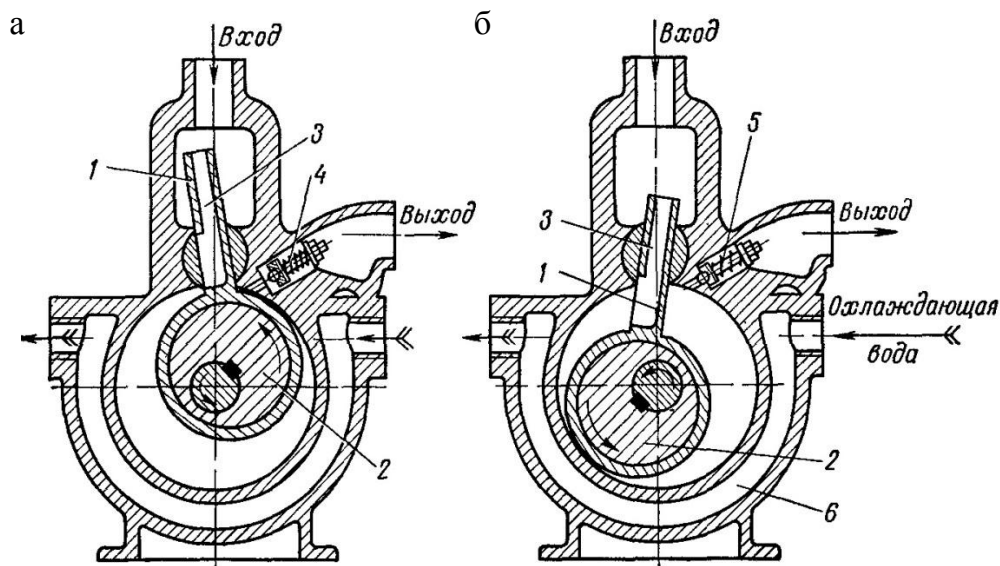


Рис. 4.3. Эксцентриковый ротационный насос с шарнирным золотником Кинни:

а – завершение периода удаления и начало периода наполнения;

б – промежуточное положение;

1 – золотник; 2 – ротор; 3 – клапан в золотнике;

4 – выходной обратный клапан открыт; 5 – выходной обратный клапан закрыт;

6 – вода, охлаждающая статор насоса

В определенные моменты времени объем левой полости увеличивается и заполняется откачиваемым газом. В течение следующего оборота замкнутый объем, заполненный газом, уменьшается, газ сжимается и выталкивается через клапан 4 в атмосферу.

В данном насосе реализуется бесконтактное скольжение ротора по поверхности цилиндра корпуса, что определяет его малый износ и надежность. Вакуумное масло, заполняя зазоры между движущимися частями, обеспечивает герметичность полостей насоса.

Рассмотренные выше ротационные вакуумные насосы с масляным уплотнением производят откачку объектов, начиная с атмосферного давления, и способны, сжимая откачиваемый газ, вытеснять его в атмосферу. Эти насосы используются как самостоятельные средства создания вакуума до 10^{-1} Па, так и в качестве вспомогательных (форвакуумных) при совместной работе с высоковакуумными насосами.

Быстрота действия насосов с масляным уплотнением практически не зависит от рода откачиваемого газа и может составлять до $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$ для пластинчато-статорных и пластинчато-роторных насосов и до $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ для золотниковых.

Серьезным недостатком вакуумных насосов с масляным уплотнением является обратный поток продуктов разложения масла из насоса в откачиваемый объект. При давлении перед насосом выше 10^3 Па плотный прямой поток откачиваемого газа препятствует диффузии углеводородов в объект откачки, но при более низких давлениях этот обратный поток нарастает и может достичь на единицу площади сечения впускного патрубка $0,5 \text{ мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$. Для уменьшения обратного потока продуктов крекинга масла, поступающего из насоса в откачиваемый объект, между ними устанавливают охлаждаемые или сорбционные ловушки.

На рис. 4.4 показана возможная схема присоединения ротационного вакуумного насоса к откачиваемому объекту. Следует иметь в виду, что каждый дополнительный элемент, включенный между объектом и насосом, создает сопротивление и таким образом снижает скорость откачки объекта и эффективность использования насоса. С другой стороны, запорной арматуры должно быть столько, чтобы была возможность испытать на работоспособность по отдельности основное оборудование вакуумной системы.

Исходя из сказанного выше следует, что фильтр 2 необходим лишь тогда, когда объект может служить источником абразивных частиц, например при вакуумировании порошковой тепловой изоляции криогенных резервуаров или при откачке адсорберов блоков очистки гелия в процессе их регенерации. Ловушка 3 необходима тогда, когда недопустимо загрязнение объекта продуктами разложения масла, идущими из насоса, или когда необходимо защитить насос от попадания в него паров воды или растворителей, идущих из объекта. Для препятствия передаче вибрации насоса на объект служит сильфон 4 или резиновый шланг. Вентиль 5 служит для напуска воздуха в объект перед его разборкой. Клапан 6 дает возможность испытать объект на герметичность. При закрытом клапане 7 можно проверить работоспособность насоса (достижение предельного вакуума без газовой нагрузки). После остановки насоса на длительный период времени масло, находящееся в масляном резервуаре насоса под атмосферным давлением, просачивается в рабочую полость насоса, в которой со-

храняется низкое давление, поднимается во впускной патрубок и даже может достичь откачиваемого объекта, если он соединен с насосом коротким трубопроводом. Это затруднит последующий запуск насоса и может вывести его из строя. Напуск через вентиль 8 атмосферного воздуха во впускной патрубок сразу после остановки насоса исключит проникновение масла в рабочую полость насоса.

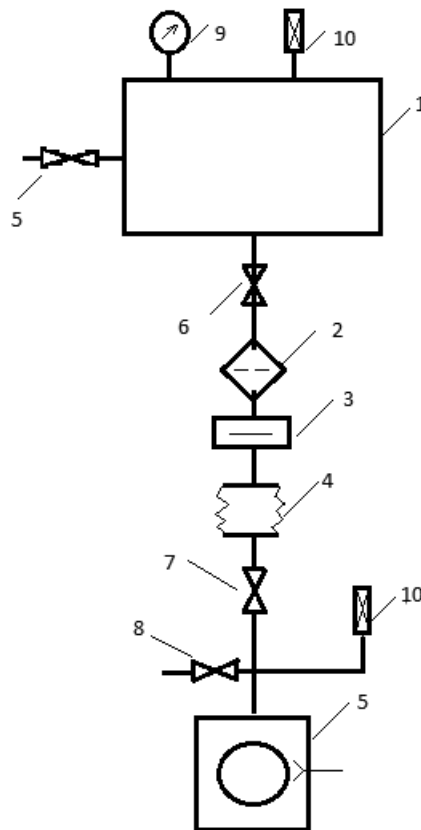


Рис. 4.4. Схема присоединения ротационного вакуумного насоса к объекту:

- 1 – объект откачки; 2 – фильтр; 3 – ловушка;
- 4 – сильфон или вакуумный резиновый шланг;
- 5, 8 – вентили напуска атмосферного воздуха;
- 6, 7 – запорные клапаны; 9 – деформационный вакуумметр;
- 10 – тепловой вакуумметр

Быстрота действия ротационных насосов объемного действия может быть определена по формуле

$$S_H = \lambda n V_K \left(1 - \frac{p_{\text{пред}}}{p_{\text{вс}}}\right), \quad (4.3)$$

где $\lambda = 0,70 \div 0,85$ [2] – коэффициент откачки насоса; n – частота вращения ротора; V_K – объем рабочей полости насоса; $p_{\text{пред}}$ – пре-

дельный вакуум, создаваемый насосом; $p_{\text{вс}}$ – давление на стороне всасывания.

Эффективная мощность N на валу насоса не является постоянной величиной. Это видно из формулы

$$N = N_{\text{тр}} + \frac{p_{\text{вс}} S_{\text{н}}}{\eta_{\text{из}}} \ln \frac{p_{\text{б}}}{p_{\text{вс}}}, \quad (4.4)$$

где $N_{\text{тр}}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в насосе; $p_{\text{б}}$ – давление газа на стороне нагнетания (барометрическое давление); $\eta_{\text{из}}$ – изометрический КПД процесса сжатия газа в насосе.

В уравнении (4.4) мощность $N_{\text{тр}}$ практически постоянная величина, она является определяющей при $p_{\text{вс}} \ll p_{\text{б}}$, поскольку при низком давлении $p_{\text{вс}}$ невелико количество сжимаемого газа. То же самое и при $p_{\text{вс}} \approx p_{\text{б}}$, так как степень сжатия близка к единице. Мощность, затрачиваемая на сжатие газа в насосе, достигает максимальных значений при давлении на стороне всасывания 30–40 кПа.

В ряде случаев насосами объемного действия приходится откачивать объекты со значительным содержанием парогазовых смесей, например при регенерации силикагеля в адсорберах гелиевых установок или при сублимационной сушке различных препаратов. В процессе сжатия таких смесей парциальное давление паров воды может превысить давление насыщения и в полости насоса образуется конденсат, который, смешиваясь с рабочим маслом, резко ухудшает характеристики насоса. Не допустить конденсации влаги в насосе можно либо путем ее вымораживания в охлаждаемой ловушке, установленной перед насосом, либо путем напуска некоторого количества сухого газа (газового балласта) во внутреннюю полость C (рис. 4.5) насоса для достижения в ней давления нагнетания раньше, чем парциальное давление водяного пара достигает давления насыщения.

Насос, имеющий устройство для напуска балластного газа, называют газобалластным вакуумным насосом. Регулируя дозатором поток газового балласта, добиваются улучшения эксплуатационных характеристик насоса. Обычно дозирующее устройство размещают в непосредственной близости от выпускного клапана. Поскольку балластный газ частично перетекает из полости сжатия C на сторону всасывания, предельный вакуум, создаваемый насосом, существенно ухудшается (иногда на один–два порядка).

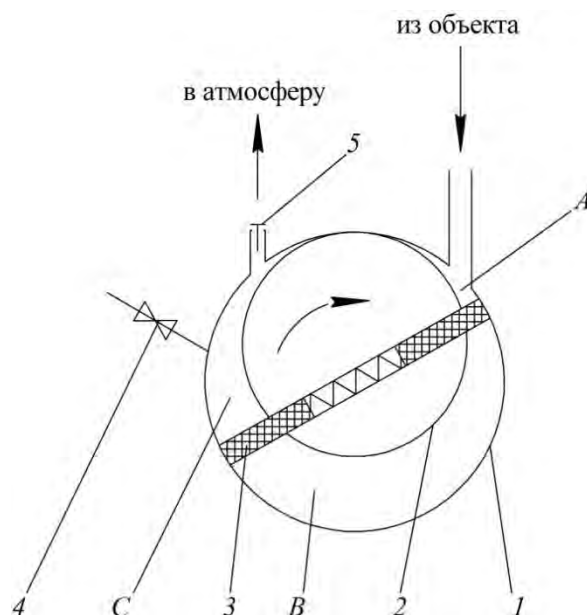


Рис. 4.5. Принципиальная схема газобалластного вакуумного насоса:
 1 – статор; 2 – ротор; 3 – пластины ротора; 4 – газобалластный вентиль;
 5 – выпускной клапан

4.1.2. Жидкостно-кольцевые вакуумные насосы

В жидкостно-кольцевых насосах в качестве рабочей жидкости может быть использована вода, кислота или какая-либо другая жидкость. Чаще всего используется вода, насосы называются водокольцевыми. Они применяются в криогенных системах для откачки кислорода или в тех случаях, когда недопустимо загрязнение объекта откачки парами масла. Схема водокольцевого вакуумного насоса показана на рис. 4.6.

Эксцентрично расположенный ротор с радиальными лопатками (рабочее колесо) вращается в цилиндрическом корпусе, который частично заполнен жидкостью. Лопатки рабочего колеса при вращении захватывают жидкость и отбрасывают ее к корпусу. В результате этого внутри корпуса образуется вращающееся кольцо жидкости, которое и дало название данному типу насосов. Между втулкой рабочего колеса и кольцом жидкости возникает серпообразное пространство, являющееся рабочей полостью машины. Это пространство разделяется лопатками рабочего колеса на отдельные ячейки переменного объема. При увеличении объема ячейки происходит процесс всасывания, а при уменьшении – процесс сжатия и нагнетания газа.

Процесс сжатия в насосе сопровождается интенсивным отводом тепла от сжимаемого газа к жидкости. Температура газа при выходе из насоса мало отличается от температуры на входе, а рабочая жидкость нагревается, поэтому ее необходимо постоянно заменять. Рабочая жидкость подается либо во всасывающий патрубок, либо через гидравлическое уплотнение вала рабочего колеса в рабочую полость машины, а уходит через нагнетательные окна вместе со сжатым газом. Основное достоинство жидкостно-кольцевых вакуумных насосов – это их простота. Насос состоит из небольшого количества деталей: корпуса, рабочего колеса и двух торцевых крышек.

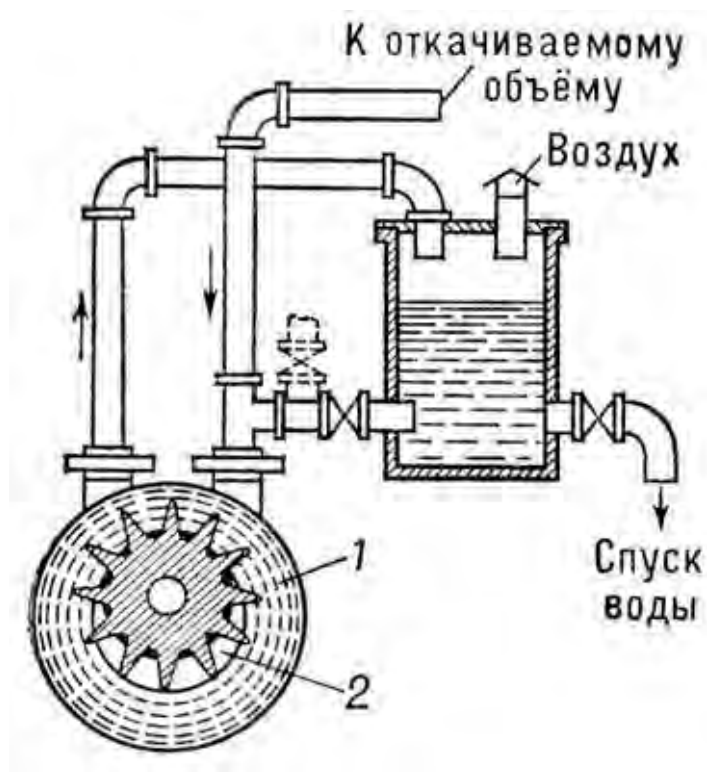


Рис. 4.6. Схема водокольцевого вакуумного насоса:
1 – водяное кольцо; 2 – серповидная камера

В насосе имеется только одна движущаяся деталь – вращающееся рабочее колесо. Между рабочим колесом и корпусом машины, а также торцевыми крышками есть гарантированный зазор, а поскольку в машине нет трущихся деталей, то отсутствует вызываемый этим износ. В насосе нет клапанов, шестеренчатых передач и других деталей, что также обеспечивает высокую надежность работы. Машина не имеет маслонасосов и специальных систем смазки. Все зазо-

ры между рабочим колесом и корпусом уплотняются рабочей жидкостью, которая смазывает также сальники уплотнения вала ротора. В консистентной смазке нуждаются только подшипники ротора.

Изготовление деталей насоса не требует высокого класса точности, все детали в нём взаимозаменяемы. В случае некоторого износа торцевых поверхностей рабочего колеса в результате многолетней работы при наличии в отсасываемом газе пыли, песка и других примесей восстановление необходимых зазоров производится подбором прокладок между корпусом и торцевыми крышками. Перечисленные особенности предопределяют невысокую стоимость насоса и простоту его обслуживания. Машина может работать в течение длительного времени автономно.

Водокольцевые вакуумные насосы относятся к числу немногих безмасляных форвакуумных насосов. Они не требуют повторной фильтрации газа и не чувствительны к попаданию в них вместе с отсасываемым газом пыли, влаги, песка и других примесей. Все это остается в жидкостном кольце, а из машины выходит очищенный газ. В то же время наличие постоянного движения жидкости не дает возможности частицам отлагаться внутри корпуса, они выносятся из машины вместе с уходящей жидкостью. Водокольцевые вакуумные насосы обеспечивают равномерное отсасывание и подачу сжимаемого газа. Они могут производить отсасывание газа и одновременно подавать его в емкость, давление в которой больше атмосферного. Одним из существенных достоинств насоса является изотермичность процесса сжатия.

Если в отсасываемых газах имеется большое количество водяных паров, то при соприкосновении с жидкостью они конденсируются в машине, в результате чего растет ее производительность. Основным недостатком водокольцевых насосов является относительно низкий вакуум. В отечественных водокольцевых вакуумных насосах предельный вакуум при нулевой производительности составляет 90–95 %. Для снижения рабочего давления применяются предвключенные воздушные эжекторы или двухроторные вакуумные насосы.

4.1.3. Двухроторные вакуумные насосы

Снизить предельный вакуум до 0,1–0,01 Па, повысить скорость откачки объекта на порядок и улучшить качество (чистоту) ва-

куума ротационных масляных и водокольцевых насосов можно путем использования вакуумных агрегатов, в которых последовательно соединены двухроторный насос с ротационным масляным или водокольцевым насосом. Первой ступенью в агрегате служит двухроторный насос, а далее газ дожимается до атмосферного давления, например, масляным ротационным насосом.

Конструкции двухроторных насосов достаточно просты (рис. 4.7). В овальной рабочей камере корпуса *1* синхронно вращаются два ротора *2*, в сечении напоминающие цифру 8. Последовательное положение роторов при вращении схематично изображено на рис. 4.8. Синхронность вращения обеспечивается закрепленными на валах роторов шестернями связи *3*, вынесенными за пределы рабочей камеры. Смазка шестерен и опорных подшипников осуществляется разбрызгиванием масла из масляной ванны. Полости масляных ванн, образованных корпусом и крышками *4* и *5*, герметичны. Вывод ведущего вала уплотняется манжетой. Для надежной герметизации вала и увеличения ресурса манжеты из масленки *6* на манжету постоянно подается масло. В двухроторном насосе используется то же масло, что и в ротационном насосе с масляным уплотнением.

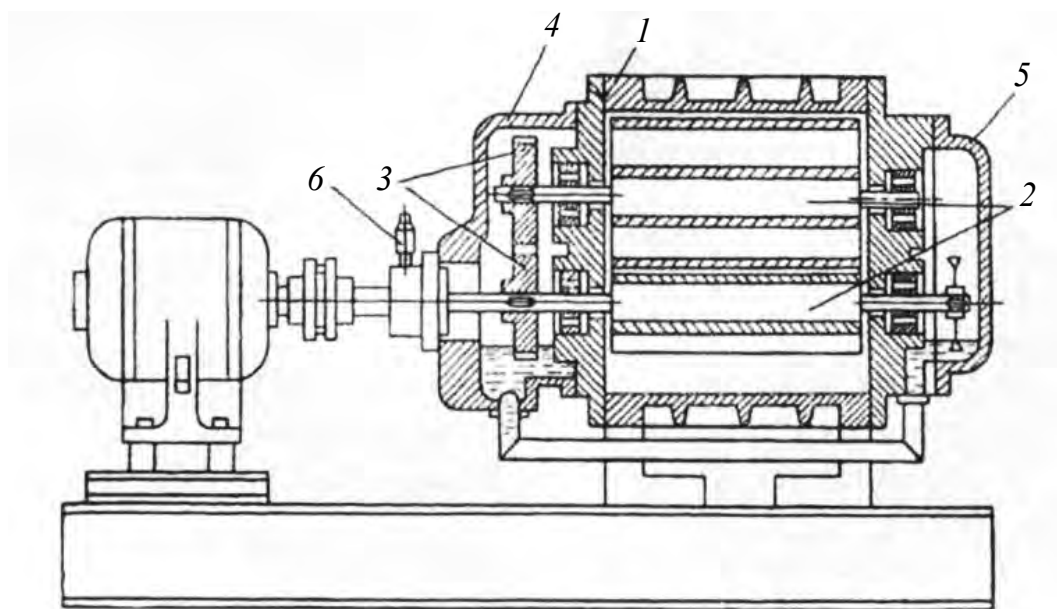


Рис. 4.7. Схема двухроторного насоса:
1 – корпус; *2* – роторы; *3* – шестерни связи; *4*, *5* – крышки; *6* – масленка

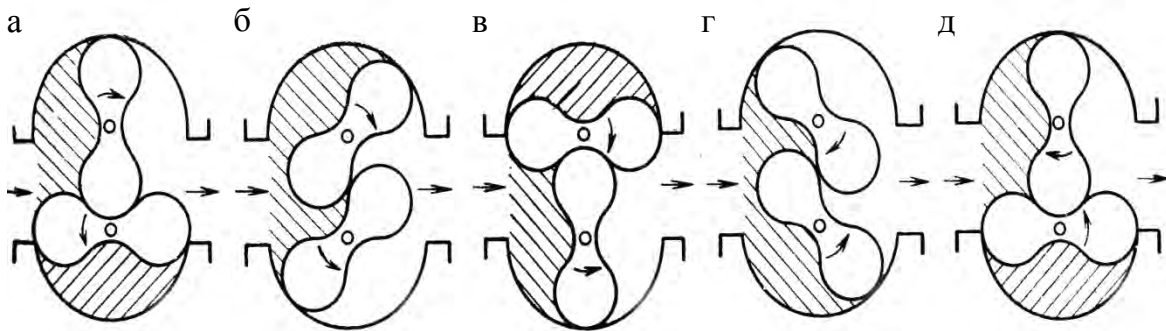


Рис. 4.8. Последовательные положения роторов при работе. Стрелками показаны направления потока откачиваемого газа и вращения роторов:
а – д – положения ротора в разные моменты времени

Особенность двухроторных насосов состоит в наличии довольно больших зазоров в роторном механизме. Если в рассмотренных ранее насосах перетечки газа с выхода на вход сказываются только при работе в области впускных давлений, близких к остаточному, а в остальное время ими можно пренебречь, то в двухроторном насосе их надо учитывать постоянно, так как они соизмеримы с откачиваемым потоком. Объемная скорость перемещения газа роторами постоянна и определяется геометрическими размерами рабочей камеры и скоростью вращения роторов. Количество же газа, протекающего по зазору, зависит от рода газа и разности давлений на входе и выходе насоса. Отсюда становится очевидной зависимость быстроты действия и предельного остаточного давления от рода откачиваемого газа и впускного и выпускного давлений. Быстрота действия на входе в двухроторный насос может быть определена по формуле

$$S_n = Vn[1 - \frac{U}{vn}(\frac{p_n}{p} - 1)], \quad (4.5)$$

где V – рабочий объем полостей между роторами и статором; n – частота вращения роторов; U – средняя проводимость зазоров; p_n – давление на выходе из насоса; p – давление на входе в насос.

Предельное давление находится из условия $S_n = 0$:

$$p_{\min} \approx \frac{U}{vn} p_n. \quad (4.6)$$

Для того чтобы смазка синхронизирующих шестерен и подшипников не попадала внутрь корпуса, валы имеют лабиринтные или ман-

жетные уплотнения. Кроме того, картер шестеренчатого зацепления, где находится масло, сообщается трубопроводом со стороной выпуска насоса, т. е. находится под низким давлением, что также уменьшает возможность проникновения масла через уплотнения вала. В тех случаях, когда в корпусе насоса недопустимы даже следы масла, синхронизирующие шестерни изготавливают из легированных сталей с соответствующей термообработкой и их не смазывают, а в подшипниках используют твердую смазку, например на основе дисульфида молибдена.

4.1.4. Вихревые вакуумные насосы

В настоящее время получили широкое распространение вихревые вакуумные насосы [4]. Они относятся к машинам динамического действия, поскольку сжатие газа в них осуществляется за счет образования в тороидальном канале серии завихрений, вызванных вращением рабочего колеса. Один из вариантов конструкции вихревого насоса схематично показан на рис. 4.9.

В корпусе 1, имеющем кольцевой канал 4, вращается рабочее колесо 6, которое представляет собой плоский диск с короткими радиальными лопатками 7, расположенными на периферии колеса. Внутренний уплотняющий выступ 5, примыкая с малым зазором к наружным торцам и боковым поверхностям лопаток, разделяет всасывающий патрубок 2 от нагнетательного 3. Оба патрубка соединены с кольцевым каналом 4.

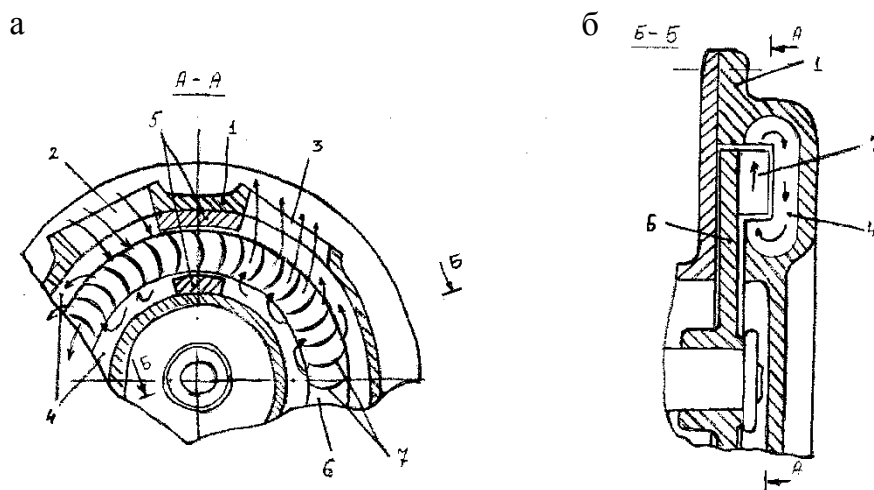


Рис. 4.9. Схема вихревого вакуумного насоса:

а – сечение А-А; б – сечение Б-Б;

1 – корпус насоса; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – кольцевой канал; 5 – разделительный выступ; 6 – рабочее колесо; 7 – лопатки

При вращении рабочего колеса *б* газ в канале *4* увлекается лопатками *7* и одновременно под воздействием центробежной силы закручивается. Таким образом, в кольцевой полости работающего насоса образуется своеобразное кольцевое вихревое движение газа. Отличительная особенность вихревого насоса заключается в том, что один и тот же объем газа, движущийся по винтовой траектории, на участке от входа в кольцевую полость до выхода из нее многократно попадает в межлопастное пространство колеса, где каждый раз получает дополнительно приращение энергии от лопаток. При этом он отбрасывается к периферии канала, закручивается, теряя скорость, и в результате давление газа линейно возрастает на протяжении всего канала и достигает максимума на выходе.

Вихревые насосы могут использоваться в тех случаях, когда не требуется вакуум значительно ниже 10^4 Па, но должен быть безмасляным.

4.1.5. Мембранные вакуумные насосы

Мембранные вакуумные насосы – это полностью сухие и абсолютно безмасляные насосы для создания низкого и среднего вакуума. Перемещение откачиваемого газа в насосе осуществляется вследствие изменения реального объема рабочей камеры из-за деформации упругой мембраны. На рис. 4.10 показана схема ступени мембранного насоса.

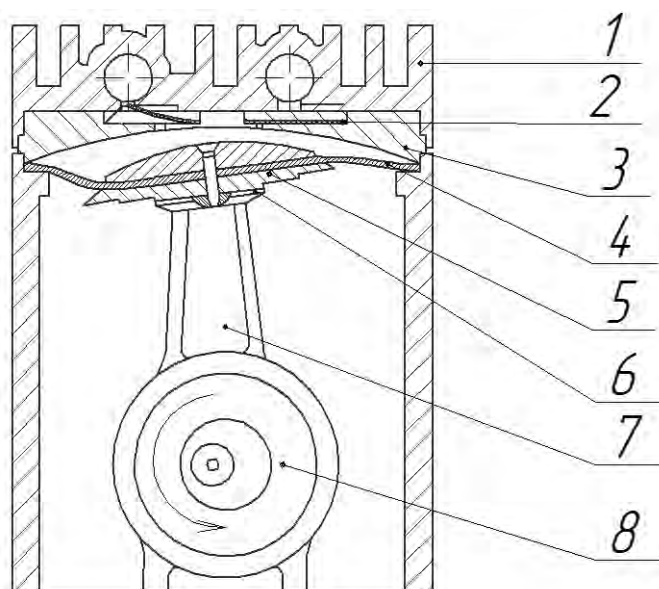


Рис. 4.10. Схема ступени мембранного вакуумного насоса:

1 – клапанная коробка; *2* – клапаны; *3* – крышка головки цилиндра; *4* – цилиндр; *5* – мембрана; *6* – поддерживающий диск; *7* – шатун; *8* – эксцентриковая втулка

Мембрана 5, герметично закрепленная по контуру между крышкой 3 и цилиндром 4, приводится в действие эксцентриком 8 по направлению вверх-вниз. При ходе вниз объем цилиндра увеличивается, он заполняется газом, который поступает из откачиваемого объекта через впускной клапан. При ходе вверх газ сжимается и выталкивается через выпускной клапан. Обычно насосы имеют от двух до четырех ступеней, которые могут соединяться последовательно или параллельно. При последовательном соединении ступеней, когда выпуск одной ступени соединяется с впуском следующей, улучшается достигаемый вакуум. При параллельном соединении ступеней увеличивается быстрота действия насоса. Например, насос типа МВНК-2×4 при последовательном соединении ступеней обеспечивает быстроту действия $S_n = 4 \text{ м}^3/\text{ч}$ и предельный вакуум $p = 250 \text{ Па}$, тогда как при параллельном соединении он дает $S_n = 8 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $p = 1000 \text{ Па}$.

4.1.6. Турбомолекулярные вакуумные насосы

Турбомолекулярные вакуумные насосы (ТВН) сходны по устройству с многоступенчатыми осевыми компрессорами. Конструктивная схема ТВН, предложенная в 1958 г. Беккером, показана на рис. 4.11, а. Она и для современных насосов остается основной.

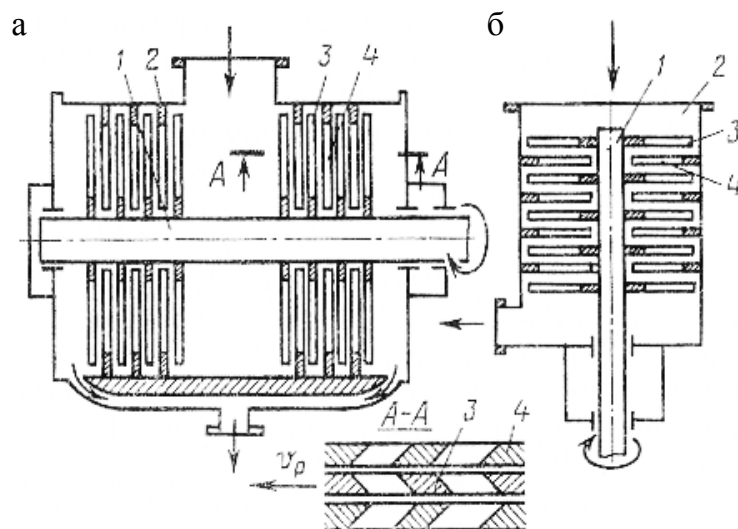


Рис. 4.11. Схемы турбомолекулярных насосов:

а – двухпоточный с горизонтальным валом; б – прямоточный с вертикальным валом:

1 – ротор; 2 – корпус; 3 – рабочие колеса; 4 – неподвижные статорные диски

В корпусе 2, имеющем неподвижные статорные диски 4, вращается ротор 1, представляющий собой вал с расположенными на нем рабочими колесами 3, которые выполняются либо в виде дисков с выфрезерованными косыми радиальными прорезями, либо в виде лопаточных колес. Лопатки устанавливаются под определенным углом к торцовой поверхности втулки. Прорези в роторных дисках располагаются зеркально по отношению к прорезям в статорных дисках. Если рабочие колеса имеют лопатки, то и статорные диски также делают с лопатками, установленными под тем же углом, но зеркально отраженными по отношению к углу установки лопаток рабочего колеса. Рабочие колеса чередуются со статорными дисками. Подшипники в торцевых крышках корпуса поддерживают вал ротора. В двухпоточных ТВН впускное отверстие расположено в средней части корпуса, отсюда газ откачивается в направлении торцов. Нагнетательные полости, расположенные по торцам корпуса, объединены общим патрубком, к которому подсоединяется форвакуумный насос. Таким образом, подшипники и уплотнения вала находятся на форвакуумной стороне.

Последнее время получили распространение ТВН с вертикальным расположением вала, что обеспечивает большую компактность вакуумной установки. Такая схема показана на рис. 4.11, б.

Современные турбомолекулярные насосы обладают высокой удельной быстротой действия и способны создавать вакуум 10^{-5} – 10^{-6} Па, а после прогрева откачиваемой системы разрежение достигает 10^{-7} – 10^{-9} Па. Теоретический предел возможного повышения вакуума с помощью ТВН определяется упругостью паров конструкционных материалов и составляет 10^{-18} – 10^{-21} Па.

Несмотря на внешнее сходство ТВН с осевым турбокомпрессором, принцип взаимодействия лопаток рабочего колеса с газом у них совершенно различный. Турбомолекулярный насос обычно работает при столь низких давлениях, что не аэродинамика проточной части, а соударения отдельных молекул газа с подвижными и неподвижными лопатками имеют решающее значение.

Рабочее колесо представляет собой решетку, состоящую из ряда пластин, установленных с некоторым шагом (рис. 4.12). При работе в молекулярном режиме рабочее колесо создает разность концентраций молекул газа, действуя как барьер, имеющий разную проводимость для молекул, поступающих с противоположных сторон. При

соответствующих геометрии и расположению пластин молекулы, поступающие на движущуюся вниз решетку со стороны низкой концентрации (стороны 1), имеют большую вероятность пройти через нее, чем молекулы, поступающие со стороны высокой концентрации (сторона 2). Предположим, что $\Sigma_{1,2}$ – часть от общего числа молекул, поступающих на решетку со стороны 1, которая после ряда столкновений с пластинками прошла на сторону 2. Аналогично $\Sigma_{2,1}$ является вероятностью прохода молекул со стороны 2 на сторону 1. Далее предположим, что N_1 и N_2 , соответственно, число молекул, поступающих в единицу времени на единицу торцевой поверхности решетки со стороны 1 и со стороны 2.

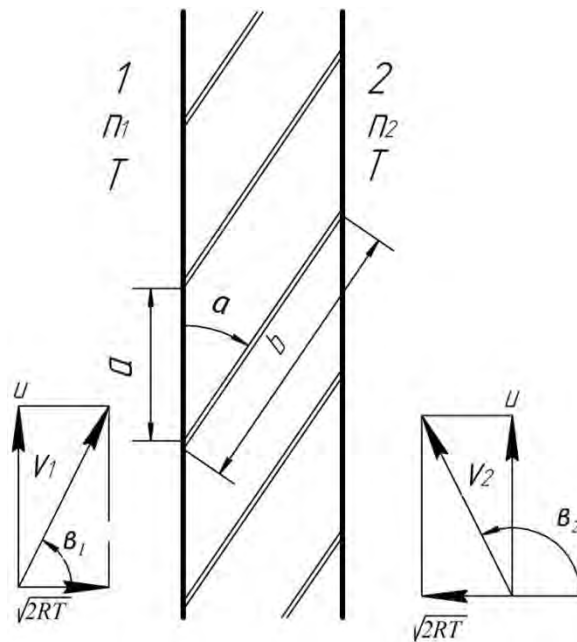


Рис. 4.12. Схема рабочего колеса ТВН

Для установившегося состояния уравнение результирующего потока молекул будет

$$N_1 W = N_1 \Sigma_{1,2} - N_2 \Sigma_{2,1}, \quad (4.7)$$

где W – по существу коэффициент X_0 .

Уравнение (4.7) можно представить в ином виде:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\Sigma_{1,2}}{\Sigma_{2,1}} - \frac{W}{\Sigma_{2,1}}. \quad (4.8)$$

Если по обе стороны от решетки температура газа одинаковая и распределение молекул по скоростям максвелловское, то отношение концентраций молекул в этих областях $\frac{n_2}{n_1}$ будет равно $\frac{N_2}{N_1}$. Тогда степень сжатия газа в рабочем колесе

$$\varepsilon = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\Sigma_{1,2}}{\Sigma_{2,1}} - \frac{W}{\Sigma_{2,1}}. \quad (4.9)$$

Формулы (4.7) и (4.9) позволяют определить два основных параметра характеристики рабочего колеса насоса – быстроту действия и степень сжатия, однако для этого требуется рассчитать значения вероятностей $\Sigma_{1,2}$ и $\Sigma_{2,1}$.

Вероятность прохождения молекул через решетку рабочего колеса в прямом и обратном направлениях может быть определена с использованием метода статистических испытаний (метода Монте-Карло).

Серьезной проблемой при разработке ТВН является уменьшение обратного потока различных углеводородных соединений, источниками которых являются смазываемые маслом подшипники и форвакуумный насос с масляным уплотнением.

Во время работы насоса с номинальной частотой вращения ротора вероятность проникновения тяжелых углеводородов из форвакуумной полости в высоковакуумную очень мала. Однако во время пуска, затормаживания и остановки насоса она резко возрастает. Не допуская длительных выдержек насоса в форвакуумном режиме и напуская чистый газ в выходные ступени проточной части при разгоне и затормаживании ротора, а также заполняя насос осушенным азотом или воздухом до давления 1000–3000 Па при остановке, можно в значительной мере снизить обратный поток углеводородов. Следует отметить как недостаток ТВН также то, что при его работе наблюдаются значительная вибрация и шум.

Полное отсутствие углеводородов в турбонасосе, устранение вибрации и шума не могут быть реализованы с помощью традиционных подшипниковых опор ротора. Первому требованию противоречит смазка, которая необходима для шариковых подшипников, второму требованию противоречит геометрическая неточность подшипников.

В качестве альтернативы опорам на шариковых подшипниках могут служить воздушные и магнитные опоры. При этом по разным причинам воздушные опоры для турбомолекулярных насосов пред-

ставляются малопригодными. Так как в нерабочем состоянии воздух из опор будет поступать в проточную часть, то потребуются дополнительные меры по изоляции откачиваемого объекта от насоса. В случае, если сжатый воздух недостаточно очищен, то это автоматически будет вызывать загрязнение углеводородами откачиваемой системы. Воздушные опоры не дадут также желаемого снижения вибрации. Напротив, магнитные опоры обеспечивают полное отсутствие углеводородов и ощутимое снижение вибрации насоса.

Турбомолекулярный вакуумный насос типа «Турбовак 550М» имеет активную магнитную подвеску ротора относительно всех пяти степеней свободы. Он развивает частоту вращения ротора 30 000 об/мин, что несколько выше по сравнению с аналогичным насосом типа «Турбовак 450» на подшипниковых опорах, развивающим частоту вращения 24 000 об/мин. Тем не менее вибрация насоса на магнитных опорах на порядок ниже. Как видно из табл. 4.1, насос на магнитных опорах имеет лучшие вакуумные характеристики. Высокие значения степени сжатия показывают, что насосы типа «Турбовак 550М» могут обеспечивать предельное давление 10^{-9} Па.

В России разработаны и выпускаются промышленностью турбомолекулярные вакуумные насосы с быстротой действия от 100 до 5000 л/с. Основные технические характеристики этих насосов приведены в табл. 4.2. Насосы типа ТМН имеют высокочастотные электродвигатели, смонтированные на валу ротора в форвакуумной полости. Питание электродвигателей осуществляется через статический преобразователь частоты, который обеспечивает двухступенчатый запуск ТМН (на частотах 150 и 300 Гц), длительную работу и торможение ротора при остановке. Насосы типа ТВН имеют привод от внешнего электродвигателя через шкив с большим передаточным отношением. Во всех насосах предусмотрены водяное охлаждение подшипников, а также вентили для заполнения насосов при остановке осушенным воздухом. Насос ТМН-100 выполнен по вертикальной прямоточной схеме, остальные насосы имеют горизонтальную двухпоточную схему.

Эффективная работа турбомолекулярных насосов возможна лишь при молекулярном режиме течения газа в каналах дисковых решеток. Поэтому ТВН требуют пониженного давления на выходе и используются лишь совместно с последовательно присоединенными ротационными насосами с масляным уплотнением или насосами других типов.

Таблица 4.1

Технические характеристики турбомолекулярных насосов

Основные характеристики	Тип насоса	
	«Турбовак 550М»	«Турбовак 450»
Частота вращения ротора, об/мин	30 000	24 000
Быстрота откачки, л/с		
воздуха	530	450
аргона	540	500
гелия	485	400
водорода	485	310
Степень сжатия:		
азота	10^{10}	$3 \cdot 10^8$
гелия	$3 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^3$
водорода	50 000	630

Таблица 4.2

Технические характеристики турбомолекулярных вакуумных насосов

Основные характеристики	Тип насоса (агрегата)					
	ТМН-100	ТМН-200	ТМН-5000	ТВН-200	ТВН-500	ТВА-200 (агрегат)
Быстрота действия, л/с	130	250	5000	200	500	200
Остаточное давление, Па	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Частота вращения ротора, об/мин	18 000	18 000	6000	16 000	12 000	16 000
Мощность двигателя, кВт	0,3	0,3	4,0	0,4	0,8	0,4
Расход охлаждающей воды, л/ч	30	30	200	—	—	50

4.2. Струйные вакуумные насосы

В струйных насосах частицам газа сообщается дополнительная скорость (в направлении откачки) от струи рабочего тела. В зависимости от фазового состояния рабочего тела различают:

1) жидкостные насосы, в которых рабочим телом является струя жидкости (обычно воды);

2) газовые насосы, в которых рабочим телом является струя газа (обычно воздуха);

3) пароструйные насосы, в которых рабочим телом является струя водяных, ртутных или масляных паров.

4.2.1. Водоструйные вакуумные насосы

В водоструйных насосах высокоскоростная коническая струя воды (рис. 4.13), истекающая из сопла, попадает в конический канал. Вблизи поверхности водяной струи создается спутный поток газа, который вместе с водой поступает в конический канал, а затем удаляется из насоса.

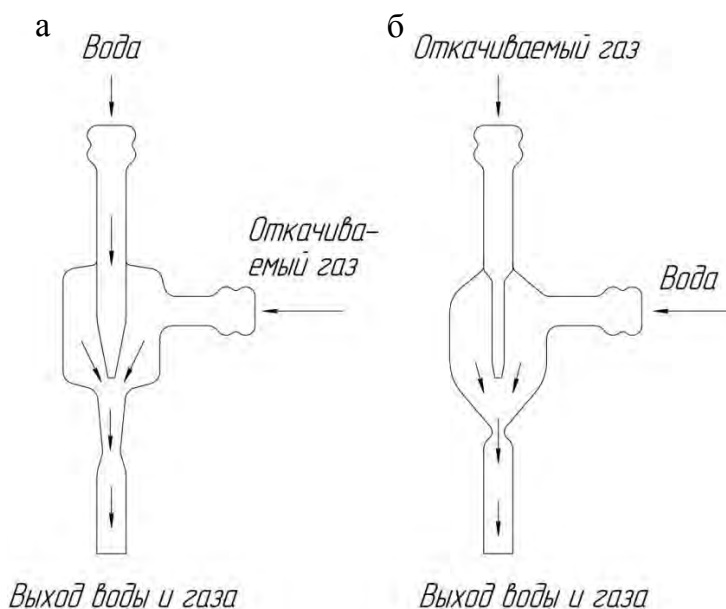


Рис. 4.13. Водоструйный насос:
а – с внутренней струей; б – с внешней струей

В хорошо спроектированном насосе, при достаточной скорости струи воды, можно получить низкое предельное давление, равное давлению насыщенного водяного пара, соответствующему температуре воды, т. е. порядка $1 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^3$ Па при температуре воды 280–300 К.

Простоте и невысокой цене водоструйных насосов противостоят большой расход воды (примерно 1 м^3 на 1 м^3 откачиваемого газа) и, прежде всего, малая быстрота действия (примерно $10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$).

4.2.2. Газоструйные вакуумные насосы

Газоструйные вакуумные насосы (эжекторы) – это аппараты, в которых полное давление газового потока увеличивается под действием струи другого, более высоконапорного газового потока. Передача энергии от одного потока к другому происходит путем их турбулентного смешивания. В криогенной технике газоструйные насосы применяют для снижения температуры криогенных жидкостей за счет понижения давления пара над ними.

Схема газоструйного насоса аналогична схеме водоструйного насоса; однако в качестве насадки может быть использовано как конфузное сопло, так и сопло Вентури. Рабочим газом при вакуумировании кислородных резервуаров обычно служит сухой очищенный воздух, а водородных – азот под давлением 0,5–1,0 МПа. Предельное разрежение может быть 10^4 Па и ниже, при коэффициенте эжекции (отношение массы эжектируемого и эжектирующего газов) примерно 0,1.

4.2.3. Пароструйные вакуумные насосы

Насосы, в которых откачивающим рабочим телом является струя пара, можно разделить на эжекторные (бустерные) и диффузионные.

В эжекторных насосах откачиваемый газ захватывается сверхзвуковой струей пара, причем часть молекул откачиваемого газа получает импульс скорости в направлении откачивания в результате столкновения с паровой струей, а часть – поглощается этой струей, так как внутри нее парциальное давление газа ниже, чем в окружающем струю откачиваемом пространстве. Различают эжекторные насосы, работающие на водяном паре (паровые), на парах ртути (ртутные), а также на парах масла (масляные). Для создания высокого вакуума используются лишь ртутные и масляные эжекторы. Эжекторные насосы часто используются не самостоятельно, а в качестве ступени диффузионного насоса.

В масляных и ртутных эжекторных насосах струя пара рабочего тела генерируется в испарителе. Она обладает большой плотностью и высокой скоростью, а это позволяет производить откачку при сравнительно высоком давлении. Такие насосы особенно удобно применять в области вакуума порядка 0,1 Па и выше, где скорость откачки ротационных масляных насосов уже недостаточна.

В противоположность эжекторным насосам, работающим при сравнительно высоких выходных давлениях, диффузионные насосы требуют предварительного вакуума на выходе порядка 10^1 – 10^{-1} Па. На рис 4.14 изображена схема диффузионного насоса.

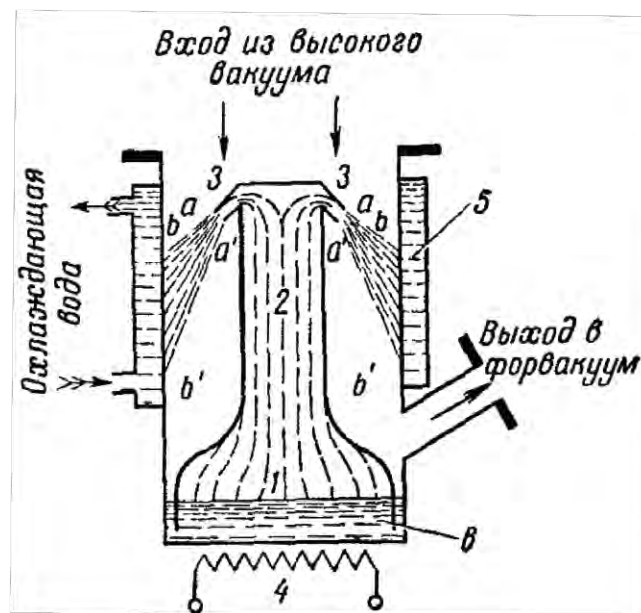


Рис. 4.14. Диффузионный насос (масляный или ртутный):
 1 – резервуар рабочего тела (испаритель); 2 – паропровод; 3 – сопло;
 4 – подогреватель; 5 – конденсатор; б – масло (ртуть); *ab* – откачивающая поверхность паровой струи («диафрагма»)

В резервуаре 1 с рабочим телом (маслом, ртутью), подогреваемом электрическим подогревателем 4, генерируется пар, который по трубе 2 попадает в тарельчатое сопло 3. В сопле происходит преобразование энергии давления пара в кинетическую энергию. Одновременно струя пара приобретает форму кольцевого усеченного конуса *aa'–bb'*. Корпус насоса на участке *bb'* (конденсатор) охлаждается водой. Пар на этой поверхности конденсируется, жидкость стекает по стенке в резервуар, где снова кипит. Таким образом, между соплом и конденсатором насоса постоянно существует поток пара рабочего тела. Молекулы откачиваемого газа со стороны входа в насос попадают на коническую поверхность *ab* струи, называемую диафрагмой, и диффундируют внутрь струи. При этом они сталкиваются с молекулами пара и получают импульс скорости в направлении движения струи рабочего тела. Концентрация газа в расширившейся после выхода из сопла струе пара очень мала, благодаря чему молекулы газа

легко диффундируют внутрь струи. После конденсации паров на стенках захваченный паром газ оказывается в выходном пространстве насоса, где давление предварительного вакуума порядка 10^2 – 10^0 Па. Отсюда газ удаляется в атмосферу форвакуумным насосом.

Диффузионные насосы, подобно ротационным, могут включаться последовательно, т. е. выход одного насоса соединяется с входом другого. Это позволяет повысить предельный вакуум или использовать насосы с менее жесткими требованиями в отношении форвакуума. Многоступенчатый диффузионный насос является своего рода реализацией последовательного соединения нескольких диффузионных насосов в общем корпусе. В таком насосе обычно применяется общий испаритель (рис. 4.15). Скорость истечения струи пара зависит от конструкции сопла, мощности подогревателя и температуры кипения рабочей жидкости в резервуаре, а также от распределения температур по длине паропровода и сопла. Пример такого распределения показан на рис. 4.15.

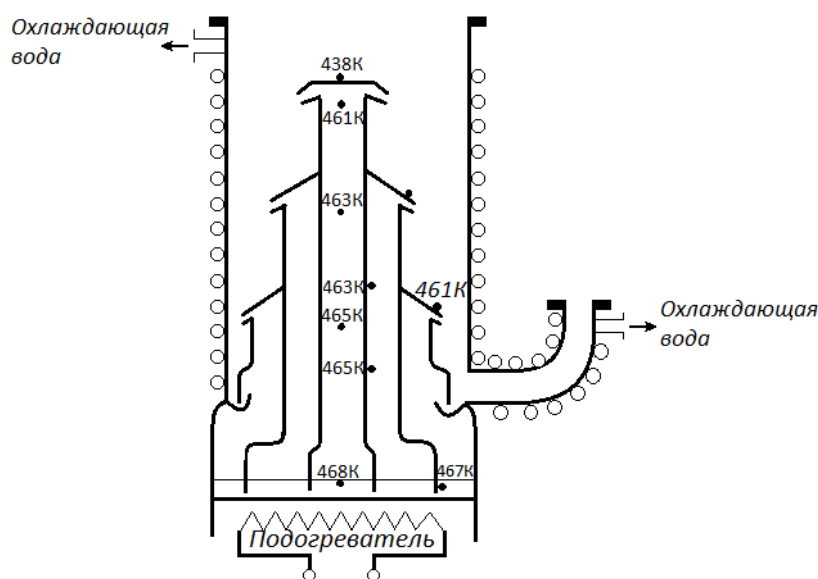


Рис. 4.15. Диффузионный вакуумный насос с фракционированием масла

Во время работы диффузионного насоса из-за высокой температуры и соприкосновения масла с металлами и газами происходят деструкция и частичное разложение его макромолекул. Вследствие этого в насосе образуются летучие фракции масла, имеющие более высокое давление паров, что ухудшает предельный вакуум. Во избе-

жание слишком частой замены или дистилляции масла процесс отделения более летучих фракций можно проводить в самом насосе. Для этого в насосах с фракционированием масла каждое сопло имеет отдельный паропровод. Причем сопло последней ступени, создающей предельный вакуум, масло для которой должно иметь как можно меньше летучих компонентов, питается из центральной части испарителя. Это связано с тем, что сконденсировавшееся масло проходит до этой части испарителя самый длинный путь: от конденсатора через все лабиринты паропроводов, погруженных в резервуар. В результате этого во внешние паропроводы, питающие сопла последних ступеней, попадают более легкие фракции масла с более высоким давлением насыщенных паров. Предельное давление в насосе с фракционированием масла на 1–2 порядка ниже, чем в обычном диффузионном насосе, и может составлять 10^{-5} – 10^{-7} Па.

Быстрота действия диффузионного насоса в значительной мере определяется площадью входного отверстия и родом откачиваемого газа. Ее можно определить по формуле

$$S_{\text{н}} = F\eta\sqrt{\frac{R_0T}{2\pi M}}\left(1 - \frac{p_{\text{пр}}}{p}\right), \quad (4.10)$$

где F – площадь кольцевого входного отверстия насоса; η – вакуум-фактор (коэффициент захвата); $R_0 = 8314$ Дж/(кмоль·К); T , p , M – соответственно температура, давление и молекулярная масса откачиваемого газа; $p_{\text{пр}}$ – предельное остаточное давление, создаваемое насосом без газовой нагрузки.

Средняя величина вакуум-фактора у современных диффузионных насосов равна примерно 0,3–0,4.

Основной характеристикой насоса является зависимость его быстроты действия от давления на входе в насос (рис. 4.16). В широком рабочем диапазоне давлений $S = \text{const}$.

Быстрота действия уменьшается в области низких давлений из-за наличия обратного потока газа и паров из насоса в откачиваемый объект. При чрезмерном увеличении впускного давления повышается и выпускное давление насоса, которое лимитируется быстротой действия форвакуумного насоса. Если последний имеет недостаточную производительность, то происходят прорыв газа из области форвакуума в область высокого вакуума и резкое падение быстроты действия диф-

фузионного насоса. Увеличивая мощность подогрева, можно несколько увеличить величину допустимого давления на выходе из диффузионного насоса, теряя при этом в быстроте действия (см. рис. 4.16).

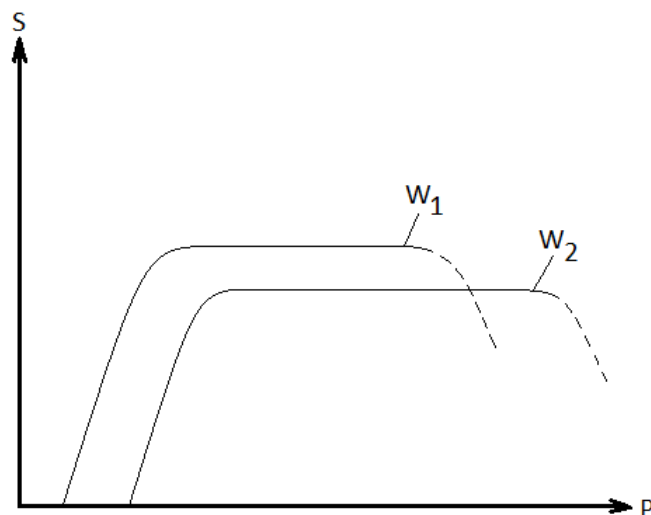


Рис. 4.16. Зависимость быстроты действия диффузионного насоса от впускного давления при разных мощностях подогрева ($W_2 > W_1$)

В масляных диффузионных насосах, даже при наилучшей конструкции первой ступени, существует поток паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объект. Он составляет в среднем по сечению входного отверстия до $5 \cdot 10^{-2}$ мг/(ч·см²). Особенно повышенная миграция паров рабочей жидкости наблюдается при пуске и остановке насоса, т. е. тогда, когда струя пара, истекающего из сопла, не сформировалась сразу после включения подогрева либо теряет напор после выключения подогрева.

Для уменьшения потока паров рабочей жидкости из насоса в объект откачки между ними устанавливают охлаждаемые устройства щелевого типа, так называемые ловушки. Последние должны обладать высокой защитной способностью:

$$\beta = Q_{\text{п}}' / Q_{\text{п}}'', \quad (4.11)$$

где $Q_{\text{п}}'$ – поток пара рабочей жидкости, поступающий из насоса в ловушку в единицу времени; $Q_{\text{п}}''$ – поток пара, прошедший через ловушку.

Вместе с тем ловушки должны иметь высокую проводимость по откачиваемому газу. Схемы некоторых ловушек и их характеристики приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Схемы и характеристики ловушек

Ловушка	Схема ловушки	Соотношение размеров, обеспечивающих максимальную проводимость и наибольшую защитную способность	$\alpha_{\text{max}}, ^\circ$	Защитная способность	Удельная проводимость, $\text{дм}^3/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$
1. Шевронная			90	$5 \cdot 10^3$	3,5
2. Шевронная кольцевая			90	10^5	3,5
3. Жалюзийная двухрядная			90	10^4	3,0
4. Коническая кольцевая			45	10^5	4,2
5. Коническая шевронная			0	10^5	3,8

Под удельной проводимостью ловушки подразумевается отношение проводимости ловушки $U_{\text{л}}$ к площади ее входного отверстия $F_{\text{л}}$:

$$U_{\text{л.уд}} = U_{\text{л}} / F_{\text{л}}. \quad (4.12)$$

Понятно, что установка ловушки между объектом откачки и диффузионным насосом значительно снижает скорость откачки объекта:

$$S_0 = (S_{\text{н}} U_{\text{л}}) / (S_{\text{н}} + U_{\text{л}}). \quad (4.13)$$

Типичная схема вакуумной системы с диффузионным насосом показана на рис. 4.17. Обязательным элементом схемы является ме-

ханический вакуумный насос с масляным уплотнением (форвакуумный насос), быстрота действия которого

$$S_{\phi} \geq (p_{\text{д.мах}}/p_{\text{ф.мин}})S_{\text{д.мах}}, \quad (4.14)$$

где $p_{\text{д.мах}}$ – максимальное рабочее давление диффузионного насоса; $p_{\text{ф.мин}}$ – минимальное давление форвакуума (давление на выходе из диффузионного насоса; $S_{\text{д.мах}}$ – максимальная быстрота действия диффузного насоса.

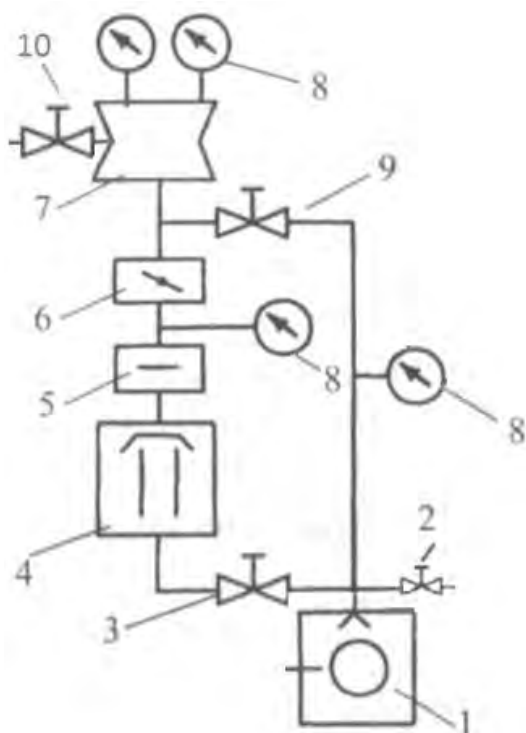


Рис. 4.17. Схема включения диффузионного насоса:

1 – форвакуумный насос; 2 – напускной клапан; 3 – клапан; 4 – диффузионный насос; 5 – ловушка; 6 – затвор; 7 – откачиваемый сосуд; 8 – манометрические преобразователи; 9 – клапан байпасной линии откачки; 10 – клапан напуска воздуха в объект

Запуск системы в работу осуществляется в следующем порядке. Закрывают затвор 6 и клапаны 2, 3, 9 и 10. Включают механический насос 1 и убеждаются в его работоспособности. Открывают клапан 3 и оценивают герметичность сборки всей системы. Открывают клапан 9 и вакуумируют объект 7 механическим насосом по байпасной линии, после чего клапан 9 закрывают. Подают воду для охлаждения корпуса диффузионного насоса и включают нагреватель

насоса. Убедившись в работоспособности диффузионного насоса, охлаждают ловушку 5, после чего плавно открывают затвор 6 и ведут вакуумирование объекта диффузионным насосом.

При остановке вакуумной системы закрывают затвор 6, отепляют ловушку 5, выключают нагреватель насоса. После охлаждения нижней части корпуса диффузионного насоса отключают воду, закрывают клапан 3, останавливают механический насос 1 и напускают в него воздух через клапан 2.

4.2.4. Криогенные струйные насосы

Паромасляные диффузионные насосы являются самым распространенным средством для создания высокого вакуума. Это объясняется простотой их конструкций и надежностью в работе. Однако они имеют ряд серьезных недостатков, которые конструкторам пока не удалось устранить. Главные из них – это миграция паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объект, невысокое значение вакуумфактора, необходимость вертикальной ориентации.

Применение в насосах охлаждаемых ловушек и отражателей, предназначенных для защиты от проникновения в вакуумные системы паров рабочей жидкости, и использование угловых присоединительных патрубков приводят к уменьшению их скорости действия на 75–80 %.

Тем не менее такие важные достоинства, как способность откачивать все без исключения газы и отсутствие движущихся частей, побудили конструкторов искать новые пути осуществления процесса откачки, не отказываясь в целом от принципа действия пароструйного насоса.

Результатом этих поисков являлись низкотемпературные струйные насосы или так называемые «холодные» диффузионные насосы, принцип действия которых тот же самый, что и паромасляных или парортутных вакуумных насосов. Отличие заключается в том, что в низкотемпературных струйных насосах рабочий газ или пар переходят на охлаждаемых стенках не в жидкую фазу, а в твердую. Это позволяет присоединять такой насос непосредственно к откачиваемому объекту в любом положении и таким образом полностью использовать его производительность. Кроме того, практически любой газ или пар может быть использован в низкотемпературном

струйном насосе в качестве рабочего тела, что делает возможным контролировать состав газа в откачиваемом объеме.

Для более конкретного пояснения принципа действия низкотемпературного струйного насоса приведена его схема (рис. 4.18).

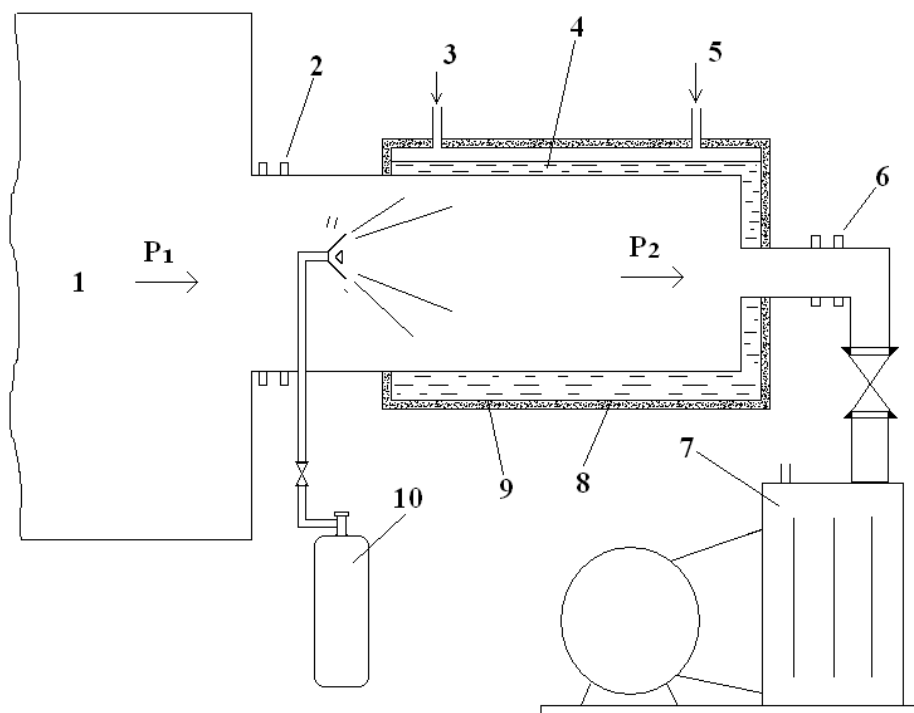


Рис. 4.18. Схема холодного диффузионного насоса:

1 – объект откачки; 2 – патрубок для подсоединения насоса к объекту; 3 – вход криоагента; 4 – охлаждаемый корпус насоса; 5 – выход паров криоагента; 6 – патрубок для подсоединения вспомогательного насоса; 7 – вспомогательный насос; 8 – рубашка; 9 – изоляция; 10 – баллон; 11 – сопло

Цилиндрический корпус насоса 4 охлаждается до низких температур криоагентом, залитым в рубашку 8. Через сопло 11 в камеру насоса вводится струя рабочего газа, который при температуре криоагента имеет низкое давление насыщенных паров. Струя производит откачку, рабочий газ вымораживается на стенках корпуса насоса, а захваченный и унесенный струей газ отводится вспомогательным форвакуумным насосом 7. В зависимости от величины впускного давления откачка осуществляется либо в режиме диффузионного, либо в режиме эжекторного насосов. Если давление достаточно низкое и происходит свободное расширение струи рабочего газа, для осуществления процесса откачки необходимо, чтобы парциальное дав-

ление откачиваемого газа в струе было меньше, чем в откачиваемом объеме. Тогда газ вследствие диффузии попадает из откачиваемого объема в струю и уносится последней. В этом случае давление рабочего газа на выходе из сопла может быть в десятки раз больше, чем давление откачиваемого газа на входе в насос, и процесс откачки соответствует режиму работы диффузионного насоса.

В противоположность этому, когда плотность газа сравнительно велика и струя рабочего газа ограничена скачками уплотнения, процесс откачки наступает только тогда, когда полное давление (давление рабочего газа плюс парциальное давление откачиваемого газа) на выходе из сопла меньше, чем давление откачиваемого газа на входе в насос. Таким образом, откачка наступает лишь в том случае, если перерасширение струи рабочего газа настолько сильное, что давление внутри нее становится ниже, чем давление в вакуумируемом объеме, и происходит подсос откачиваемого газа. Такой же процесс откачки соответствует работе насоса в эжекторном режиме.

Идея создания низкотемпературных струйных насосов относится к середине прошлого столетия, но до сих пор работы, посвященные этому вопросу, носят в основном исследовательский характер и пока нет достаточно четких представлений о путях создания эффективных насосов данного типа. Это объясняется как трудностью их расчета, так и большой сложностью процессов, происходящих в низкотемпературных струйных насосах.

Например, в низкотемпературных насосах геометрия проточной части непрерывно меняется вследствие намораживания на стенках корпуса твердого слоя конденсата рабочего газа, что, естественно, сказывается на характеристиках откачки и сокращает продолжительность откачивающего действия насоса. Механическое удаление конденсата значительно усложняет конструкцию и вряд ли оправдано. Следует иметь в виду также повышение температуры поверхности конденсации по мере роста слоя конденсата. Это происходит вследствие существенного термического сопротивления конденсата. Причем сопротивление непостоянно и зависит не только от толщины слоя, но и от интенсивности намораживания, от температуры охлаждаемой поверхности и многих других факторов. Какое-то влияние на характеристики откачки оказывает эффект криозахвата и сорбции молекул откачиваемого газа непрерывно обновляемыми слоями сконденсированного рабочего газа.

Возможности одноступенчатого криогенного диффузионного насоса показаны в работе [5]. Рабочим газом служил диоксид углерода. В этом насосе внутренний диаметр охлаждаемого жидким азотом конденсатора составлял 110 мм. Форвакуумная откачка осуществлялась системой последовательно соединенных парортутного и механического насосов. Максимальная быстрота действия $0,65 \text{ м}^3/\text{с}$ была достигнута при использовании сопла Лаваля, имеющего наибольшую степень расширения – 400.

Насос обеспечивал большую степень сжатия: при предельном вакууме $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ наибольшее выпускное давление было равно $1,3 \text{ Па}$, а удельный расход CO_2 составлял $2,0 \cdot 10^{-1} \text{ г/ м}^3$ откачиваемого воздуха. В работе отмечается, что для удовлетворительной работы насоса содержание неконденсирующихся примесей в CO_2 не должно быть выше $5 \cdot 10^{-2} \%$, а конструкция конденсатора должна обеспечивать полную конденсацию рабочего газа как в области высокого вакуума над соплом, так и на стороне предварительного разрежения.

Важно отметить, что в исследуемом насосе коэффициент X_0 был примерно в 1,5 раза выше, чем у паромасляных диффузионных насосов, и в оптимальном режиме достигал 0,6.

4.3. Сорбционные вакуумные насосы

В вакуумной технике сорбционные процессы или явления не только создают большие трудности в поддержании контролируемой газовой среды в высоковакуумных системах, но и открывают широкие возможности в области создания эффективных средств откачки, которые позволяют получать и сохранять высокий вакуум.

Базирующиеся на сорбционных процессах выносные стандартные насосы и уникальные встроенные системы откачки в настоящее время успешно используются при выполнении различных физических экспериментов, в имитаторах космического пространства и целом ряде других новейших технологий. Они наиболее экономично обеспечивают высокое качество вакуума, т. е. его чистоту, и в то же время практически не имеют ограничения в быстроте действия.

Термин «сорбция» используется в современной литературе по вакуумной технике как некоторое комплексное понятие, характеризующее все виды взаимодействия свободных атомов и молекул с по-

верхностью сорбирующего вещества, включая образование химических соединений. Традиционно сорбционные процессы на поверхности твердых тел разделяются на две самостоятельные категории – физическую адсорбцию и хемосорбцию.

Физическая адсорбция – это самопроизвольный и полностью обратимый процесс, аналогичный процессу конденсации. В нем силы Ван-дер-Ваальса являются определяющими. Характер их во многом зависит от того, обладают или нет адсорбируемые молекулы и адсорбент полярными свойствами. При физической адсорбции адсорбированное вещество не изменяет своих индивидуальных свойств и при десорбции выделяется в первоначальном виде.

Физический механизм *хемосорбции*, подобно образованию химических соединений, обусловлен перегруппировкой электронов взаимодействующих частиц. Важнейшими формами таких перегруппировок являются либо передача одного или большего числа электронов от одного из атомов другому, либо смещение электронов в направлении к одному из атомов, причем большей частью при этом образуются электронные пары, общие для взаимодействующих частиц и связывающие их между собой.

Поскольку сорбционные процессы всегда экзотермические, то их интенсивность, очевидно, зависит, во-первых, от способности молекул газа отдавать адсорбенту достаточное количество энергии, чтобы оставшейся энергии было недостаточно для преодоления сил сорбционного притяжения, а во-вторых, от способности адсорбента быстро отводить полученную энергию из зоны соударения. Отсюда следует, что не каждая молекула газа, столкнувшись с поверхностью адсорбента, адсорбируется на ней и отношение числа адсорбированных частиц к числу падающих за тот же промежуток времени, названное коэффициентом прилипания, всегда меньше единицы. Так как величина коэффициента прилипания под воздействием множества факторов изменяется, то не остается постоянной и интенсивность адсорбционных процессов. Таким образом, интенсивность v_a , с которой молекулы адсорбируются, может быть выражена через интенсивность соударений молекул газа с поверхностью адсорбента

$$v = \frac{1}{4} n v_a \quad (4.15)$$

и коэффициент прилипания α

$$v_a = \alpha v, \quad (4.16)$$

где n – молекулярная плотность газа, а v_a – средняя арифметическая скорость движения его молекул.

Для всех сорбционных средств откачки характерна значительная селективность поглощения отдельных газов.

4.3.1. Испарительные геттерные вакуумные насосы

Принцип действия испарительных геттерных насосов основан на физическом и химическом связывании газов на поверхности и в объеме активных веществ – геттеров. В качестве геттеров могут быть использованы пленки титана, бария, циркония и других химически активных металлов. Обновление пленок производят путем термического испарения соответствующего металла и последующего осаждения его на охлаждаемой поверхности стенок корпуса насоса или на специальных металлических листах, помещенных в вакуумной камере.

Интенсивность откачки геттерами значительно увеличивается при снижении температуры поглощающей поверхности. Очевидно, это связано с тем, что при низкой температуре поверхности миграция на ней частиц осаждаемого металла затормаживается, что способствует образованию пористой пленки с хорошо развитой поверхностью. Кроме того, при понижении температуры пленки снижается равновесное давление легкоконденсируемых газов, а также замедляются процессы образования новых химических соединений, в частности метана.

На рис. 4.19 показано схематическое устройство геттерного насоса, основными элементами которого являются корпус 7, испаритель 6 активного металла и вкладыш, охлаждаемый жидким азотом 5. В насосах без азотного охлаждения пленка осаждается непосредственно на корпусе, который в этом случае должен иметь водяное охлаждение. С целью защиты откачиваемого объекта от запыления испаряемым геттером в некоторых конструкциях насосов устанавливают экран 3. Поскольку инертные газы, а также предельные углеводороды практически не связываются геттерами, то их необходимо откачивать насосами других типов небольшой быстроты действия. Для присоединения этих насосов служит выпускной патрубок 1. Через него производят также предварительное вакуумирование.

В небольших насосах нагревание геттера в основном осуществляется прямонакальным методом. В этом случае нить из актив-

ного металла или биметаллическая проволока из несущего и испаряемого металлов нагреваются пропускаемым по ним током.

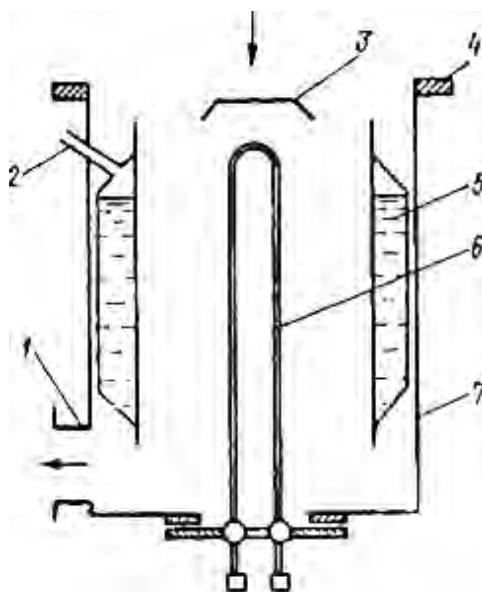


Рис. 4.19. Испарительный геттерный насос:

- 1 – выпускной патрубок; 2 – патрубок для заливки криогента;
3 – экран; 4 – фланец для подсоединения к объекту откачки;
5 – жидкий азот; 6 – испаритель; 7 – корпус

В насосах больших размеров ток пропускается через нить из тугоплавкого металла, например вольфрама, а проволока геттера наматывается на нее, либо эти две проволоки скручиваются вместе.

Более совершенными являются испарители с нагревом геттера, от бомбардировки его электронами высокой энергии. В таких насосах электроны, эмиттируемые катодом, устремляются к аноду, на который нанесен геттер. Температура геттера при этом повышается до величины, достаточной для его испарения. В ряде случаев применяются дуговые испарители.

Поглощающие свойства геттеров могут быть значительно улучшены путем возбуждения или даже ионизации молекул откачиваемого газа потоком электронов. Поэтому в насосы с термическим распылением геттера часто вводят катодный термоэмиттер электронов и другие электроды, создающие электрические поля. Для увеличения пути пробега электронов и, следовательно, числа их столкновений с молекулами газа применяют различные методы: анод делают в виде сетки, используют магнитные поля для отклонения траекторий

электронов и т. д. Ионизированные молекулы разгоняются в электрическом поле до скоростей, во много раз превышающих средние тепловые, и при столкновении с поверхностью пленки геттера проникают в нее на некоторую глубину. Это интенсифицирует хемосорбцию активных газов, а также увеличивает время пребывания на поверхности молекул инертных газов, что повышает вероятность «замуровывания» их новыми слоями напыленного геттера.

Основными вакуумными характеристиками испарительных геттерных насосов считаются диапазон рабочих давлений и коэффициент захвата.

В большинстве насосов этого типа верхним пределом рабочего давления является форвакуум 1,0–0,1 Па; однако, во избежание быстрого израсходования геттера, насос целесообразно включать при давлении ниже 10^{-3} Па. Это предварительное разрежение обеспечивают с помощью других насосов.

Нижний предел рабочего давления данных насосов определяется в основном чистотой используемого геттерного материала, равновесным давлением газов над поверхностью сорбирующей пленки активного металла и эффективностью связывания или отвода из насоса трудносорбируемых инертных газов и углеводородов. Для насосов с водяным охлаждением предельное остаточное давление может быть 10^{-8} Па, а для охлаждаемых жидким азотом – 10^{-11} Па.

Другой основной вакуумной характеристикой испарительных геттерных насосов является *коэффициент захвата*, определяющий вероятность поглощения молекул газа, входящих в насос через его впускной патрубок:

$$\gamma = \frac{S}{U_{\text{вх}}} = \frac{N}{N_{\text{вх}}}, \quad (4.17)$$

где γ – коэффициент захвата насоса; S – быстрота действия насоса; $U_{\text{вх}}$ – проводимость входного отверстия насоса; N и $N_{\text{вх}}$ – соответственно число молекул, поглощенных насосом, и число молекул, вошедших в насос за один и тот же период времени.

Величина коэффициента захвата зависит как от геометрии насоса, так и от эффективности поглощения молекул газа всеми сорбирующими поверхностями, т. е. от коэффициента прилипания. Непременным условием поддержания высоких значений коэффициента прилипания на всех поглощающих поверхностях является рав-

ная степень насыщения слоя геттера в любой точке. В противном случае он используется неэффективно.

4.3.2. Магниторазрядные вакуумные насосы

Магниторазрядные насосы являются геттероионными и отличаются от испарительных тем, что в них как для распыления геттера, так и для ионизации газов используется высоковакуумный газовый разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях. Схема простейшего диодного магниторазрядного насоса показана на рис. 4.20.

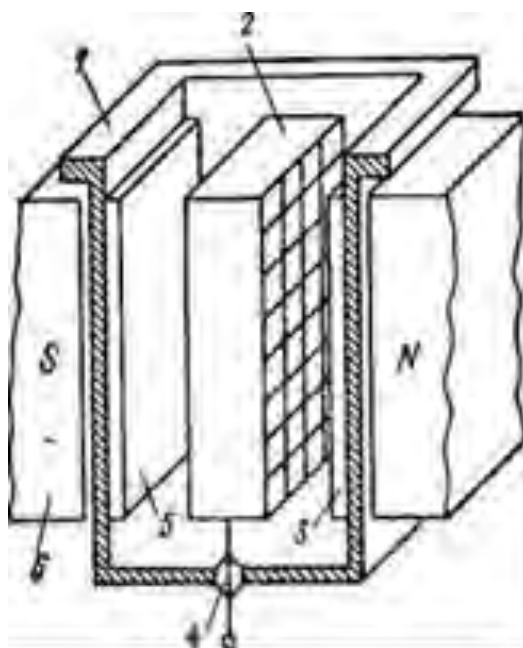


Рис. 4.20. Магниторазрядный насос:
1 – корпус; 2 – анод; 3, 5 – пластины катода;
4 – изоляторы; 6 – магнит

В корпусе 1 насоса размещается электродная система, состоящая из анода 2, имеющего форму ячеек, и пластин 3 и 5 катода. Пластины катода располагаются по обе стороны от анода напротив открытых концов его ячеек. Корпус насоса помещается в магнитное поле магнита 6. Причем электродная система ориентируется так, чтобы линии магнитного поля были перпендикулярны плоскости катодов. Корпус насоса и ячейки анода обычно изготавливают из немагнитного материала, например из нержавеющей стали. Материалом пластин

катода служит титан или какой-либо другой химически активный металл. Анод, как правило, укрепляют в корпусе на изоляторах 4, а катод вместе с корпусом заземляют, хотя в некоторых случаях, наоборот, заземляют анод.

При подаче на электроды разности потенциалов в несколько киловольт между ними зажигается тлеющий разряд. Возникновение газового разряда обусловлено тем, что в объеме ячейки всегда имеется некоторое число свободных электронов, либо блуждающих, либо появившихся в результате автоэлектронной эмиссии с острых кромок электродов. Под действием электрического поля эти электроны ускоряются, но магнитное поле препятствует их прямолинейному движению непосредственно к аноду, заставляя двигаться по спиральным траекториям взад и вперед в ячейке между катодами, пока, наконец, не попадут на анод. Из-за большой длины пути электронов существует вероятность их столкновения с молекулами газа даже при очень низких давлениях, когда средняя длина свободного пробега электронов в газе во много раз превышает расстояние между анодом и катодом. В результате столкновения с электронами нейтральные молекулы газа ионизируются или активируются. Поскольку магнитное поле слабо влияет на поведение положительных ионов, ввиду их большой массы, то они с ускорением движутся практически по прямолинейным траекториям к катодам. Образующиеся в результате ионизации молекул электроны начинают двигаться, как и первичные электроны, по винтообразным траекториям, принимая участие в поддержании разряда. Ускоренные электрическим полем положительные ионы бомбардируют катоды, вызывая эмиссию вторичных электронов, которые, в свою очередь, также ускоряются и ионизируют газ. Кроме того, ионная бомбардировка катодов вызывает распыление материала, из которого они изготовлены.

В большинстве случаев катоды сделаны из титана, который в процессе распыления переносится на другие части насоса: анод, корпус насоса и даже на противоположный катод. Непрерывно возобновляемая пленка напыляемого металла сорбирует либо замуровывает молекулы газа, попавшие на ее поверхность.

Чем выше давление откачиваемого газа, тем больше образуется ионов, которые бомбардируют катоды, тем интенсивнее распыляется геттер и поглощается газ. Понижение давления уменьшает ионный ток и расход распыляемого геттера. Таким образом, в магнито-

разрядном насосе автоматически регулируется скорость распыления катодов, что обеспечивает экономное расходование геттера и длительный, в несколько десятков тысяч часов, ресурс работы.

Механизм откачки отдельных газов в магниторазрядных насосах во многом сходен с механизмом, определяющим работу испарительных геттерных насосов. Однако интенсивная ионизация и диссоциация молекул откачиваемого газа в газовом разряде делают магниторазрядный насос более эффективным средством откачки инертных газов, углеводородов и других сложных молекул.

Химически активные газы откачиваются за счет хемосорбции на электродах и стенках насоса. При откачке H_2 из-за малой массы его ионов катод не распыляется, газ в основном связывается на катодах. Диффундируя вглубь металла, водород вступает в соединение с титаном, образуя гидрид TiH . Так как TiH имеет больший объем, чем сам Ti , то при длительной откачке водорода пластины катода растрескиваются и деформируются. В случае откачки водорода в смеси с другими более тяжелыми газами, которые интенсивно распыляют титан, значительная часть водорода откачивается поверхностями анода и корпуса насоса.

Откачка инертных газов в магниторазрядных насосах происходит в основном на катодах путем внедрения в них быстрых ионов, которые после нейтрализации удерживаются силами физической адсорбции. Непрерывно напыляемый титан замуровывает сорбированные молекулы. Как правило магниторазрядные насосы используются для создания высокого и сверхвысокого безмасляного вакуума в диапазоне 10^{-2} – 10^{-9} Па.

4.3.3. Криоадсорбционные вакуумные насосы

Определенные твердые материалы, такие как цеолиты, активированные угли, силикагели, обладают способностью сорбировать большое количество газов. Это явление нашло широкое применение для откачки газов из вакуумных систем. Причиной тому являются такие положительные качества данного метода, как «чистота» вакуума, минимальные парциальные давления высококипящих компонентов воздуха, простота устройства, позволяющая эксплуатировать адсорбционные насосы практически без обслуживающего персонала.

Основными элементами конструкции адсорбционного вакуумного насоса (рис. 4.21) являются герметичный корпус с отверстием для входа откачиваемого газа и сосуд с криоагентом, на поверхности которого расположен слой адсорбента. Этот сосуд укрепляют внутри корпуса, обеспечивая минимальный подвод тепла по опорам. В некоторых насосах слой адсорбента защищают от теплопритока излучением экраном типа жалюзи (см. рис. 4.21, в). Адсорбционные насосы для форвакуумной откачки (см. рис. 4.21, г) часто выполняют в виде цилиндрического сосуда, заполненного адсорбентом, в который вставлен сетчатый патрон небольшого диаметра, предназначенный для улучшения подвода газа к сорбенту в удаленной части насоса. В качестве адсорбентов в адсорбционных вакуумных насосах в основном используются углеродные сорбенты (активированные угли), цеолиты (молекулярные сита) и силикагели.

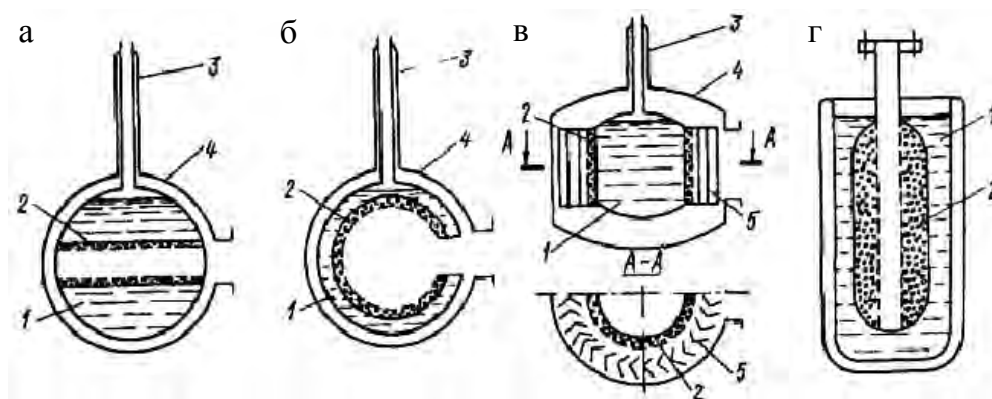


Рис. 4.21. Адсорбционные насосы:

а – г – варианты конструктивного исполнения насосов;
 1 – сосуд с жидким азотом; 2 – адсорбент; 3 – трубка для залива азота;
 4 – корпус; 5 – тепловой экран типа жалюзи

Большинство промышленных адсорбентов отличаются сложной внутренней структурой, включающей поры различного размера. При этом решающее влияние на адсорбционную способность и скорость поглощения оказывает содержание мелких пор в единице объема адсорбента. В зависимости от размеров поры подразделяются на три типа: микро- и макропоры, переходные поры.

Микропоры имеют радиусы от 5 до 15 Å, т. е. соизмеримые с размерами адсорбируемых молекул. Суммарный объем микропор промышленных адсорбентов обычно не превышает 0,5 см³/г. Харак-

терной чертой поглощения газов в микропорах является повышение в среднем в 1,6 раза энергии адсорбции по сравнению с адсорбцией в более крупных порах. Это приводит к существенному возрастанию адсорбционной способности микропористых адсорбентов в области малых равновесных давлений, что особенно важно для криовакуумной техники. Адсорбция в микропорах сводится к заполнению адсорбируемыми молекулами всего адсорбционного пространства, в связи с чем основными параметрами микропор являются их удельный объем и обобщенная характеристика размеров.

Эффективные радиусы более крупных переходных пор много больше размеров адсорбируемых молекул, они колеблются от 15 до 1000–2000 Å. Для переходных пор действие адсорбционных сил проявляется не во всем их объеме, а только на небольшом расстоянии от поверхности. Поэтому поглощение молекул газа осуществляется в этих порах путем последовательного образования на их поверхности адсорбированных слоев, завершающегося капиллярной конденсацией. Основными параметрами переходных пор являются удельная поверхность, объем пор и функция распределения объема пор по размерам. Удельная поверхность может быть в пределах от 10 до 400 м²/г. Переходные поры, так же как и макропоры, имеющие эффективные радиусы более 1000–2000 Å, служат основными транспортными артериями, по которым осуществляется подвод адсорбируемых молекул к микропорам.

К настоящему времени сформулированы основные принципы создания эффективных адсорбентов для криовакуумной техники. Прежде всего, адсорбент должен иметь максимальный объем пор оптимального размера (лишь немного превосходящего диаметр адсорбируемых молекул) и, кроме того, должен обладать достаточно высокой теплопроводностью.

Для обеспечения высокого предельного вакуума и большого ресурса работы насоса очень важно поддерживать оптимальную температуру адсорбента и высокую степень его регенерации для освобождения ультрамикропор от ранее адсорбированного газа. Эффективным способом повышения теплопроводности слоя адсорбента является металлизация части поверхности его гранул путем нанесения на них слоя меди. При этом скорость адсорбции в отдельной грануле снижается, но зато меньше становится градиент температуры в слое сорбента. В целом же характеристики откачки насоса с металлизированным адсорбентом улучшаются.

Активированный, или активный, уголь – это адсорбент органического происхождения. Например, уголь марки АГ получают на основе ископаемого угля; уголь СКТ-2 – из торфа; сарановый уголь – путем разложения поливинилиденхлорида и т. д. Характерной особенностью пористой структуры активного угля является ее полидисперсность с широким диапазоном распределения пор по размерам. Все виды активного угля практически не адсорбируют воду, поэтому их можно регенерировать при сравнительно низких значениях температуры.

Синтетические цеолиты – это кристаллические гидрированные алюмосиликаты, чаще всего натрия или кальция, с исключительно однородными по размерам порами и каналами («окнами»), соединяющими поры между собой и с поверхностью. Поры цеолитов типа А и Х представляют собой практически сферические полости с диаметром 11,4 Å для цеолитов А и диаметром около 11,9 Å для цеолитов Х. Эффективные диаметры окон существенно различаются для каждого типа цеолита. Так, для цеолита типа А в натриевой форме (марка NaA) диаметр окон близок к 4 Å, а для кальциевой формы этого цеолита (марка CaA) он равен ~5 Å. Для цеолита марки CaX эффективный диаметр окон приближается к 8 Å и, соответственно, для цеолита марки NaX он близок к 9 Å. Таким образом, основное различие между цеолитами типов А и Х заключается в размерах окон, соединяющих полости их пор.

Для удобства применения в технике цеолиты выпускаются в виде гранул, таблеток, шариков и т. п., в которых кристаллический порошок скреплен различными связующими веществами, обычно глинами. Адсорбционная емкость гранулированных цеолитов составляет примерно 75–85 % емкости кристаллов без связующего.

Основными параметрами адсорбционного вакуумного насоса, как и насосов других типов, являются предельный вакуум и быстрота действия. Однако определить эти характеристики для адсорбционных насосов весьма трудно. Объясняется это тем, что процесс криоадсорбции очень сложен и может быть разделен на два этапа. Первый этап – передача молекулами газа своей энергии твердому телу сорбента и захват их поверхностью. Второй этап – диффузионный перенос адсорбата внутрь адсорбента с последующей возможной локализацией в местах наибольшего действия адсорбционных сил. Если первый этап происходит практически мгновенно и адсорбированный на поверхно-

сти слой образуется со скоростью, пропорциональной давлению газовой фазы, то второй этап требует значительного времени.

Для продолжения адсорбции необходимо, чтобы скорость диффузии вещества внутрь тела была не меньше скорости его поступления на поверхность. Поэтому именно интенсивность второго этапа в значительной степени определяет как быстроту действия насоса, так и время достижения предельного равновесного давления. Скорость проникновения адсорбата внутрь гранулы адсорбента определяется свойствами как одного, так и другого, причем коэффициент диффузии является также сложной функцией концентрации. Все это делает расчет характеристик адсорбционных насосов весьма сложным и требует детального анализа статических и динамических изотерм адсорбции.

В качестве примера на рис. 4.22 показаны изотермы адсорбции водорода на цеолитах. Кроме того, на рисунке даны изотермы адсорбции водорода на синтетических цеолитах CaA-4, NaX2M и на активном угле БАУ при температуре 20,4 К. Как видно из рис. 4.22, по адсорбции водорода цеолит CaE-T значительно превосходит все остальные цеолиты и даже не уступает палладированному силикагелю. На рис. 4.23 дается сравнение адсорбционной способности по азоту угля КУТ и угля СКТ-2 с адсорбционной способностью цеолитов различных марок [6].

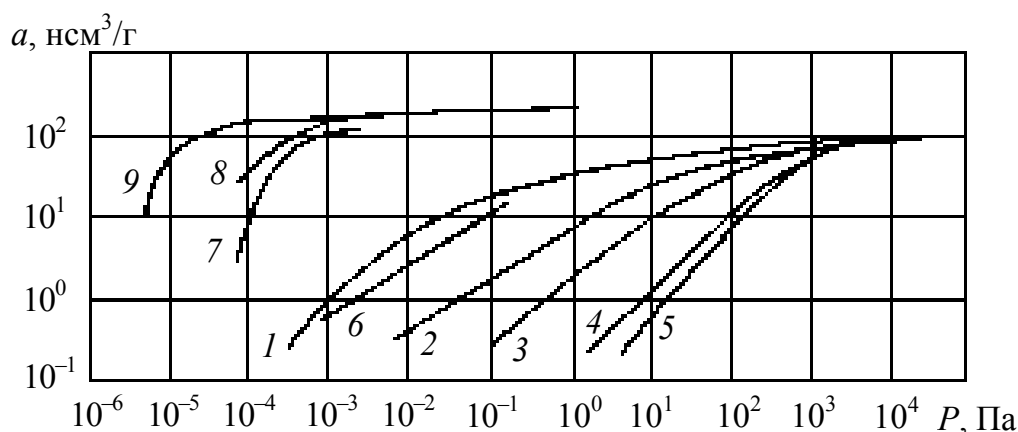


Рис. 4.22. Изотермы адсорбции H_2 на синтетических цеолитах:
1 – CaE-T; 2 – CaX; 3 – CaA; 4 – NaA; 5 – NaX; 6 – палладированный силикагель
при температуре 77 К; 7 – CaA-4;
8 – NaX2M; 9 – на угле БАУ при температуре 20,4 К

На адсорбционные свойства цеолитов определенное влияние оказывает степень их отрегенерированности по отношению к ранее адсорбированной влаге.

Например, для одного и того же образца цеолита СаА-4 адсорбционная емкость по воздуху при давлении $\sim 1 \cdot 10^{-2}$ Па составляла 29,17 и 10 нсм³/г в зависимости от того, была ли температура регенерации соответственно 723, 403 или 373 К. Кроме того, на результаты определения адсорбционной емкости адсорбентов могут влиять несоблюдение условий изотермичности и отсутствие истинного равновесия.

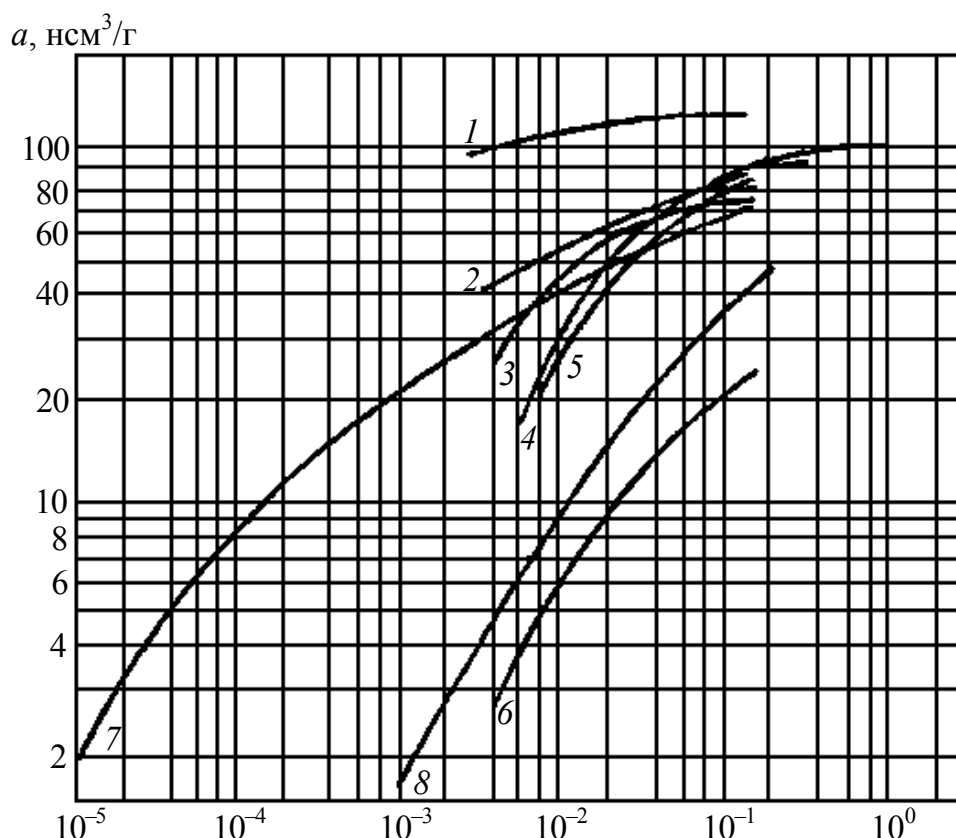


Рис. 4.23. Изотермы адсорбции азота при температуре 77 К на адсорбентах различных марок:

- 1 – природный шабазит; 2 – цеолит СаЕ-1013 ГОБ (порошок);
3 – цеолит СаЕ-1013-13 (гранулы); 4 – цеолит СаЕ-192 Ш (порошок);
5 – цеолит СаЕ-192 П (порошок); 6 – цеолит СаА ц-202-128; 7 – уголь КУТ;
8 – уголь СКТ-2

Эффективная работа адсорбционного вакуумного насоса зависит не только от качества адсорбента, но и от рациональной конструкции, которая должна обеспечивать:

- 1) минимальную разность температур между поверхностным слоем адсорбента и криоагентом;
- 2) минимальное гидравлическое сопротивление на пути газа к адсорбенту;

- 3) минимальный расход криоагента;
- 4) минимальную теплоемкость охлаждаемых элементов.

Поскольку при откачке воздуха коэффициент прилипания молекул газа на поверхностном слое адсорбента, охлаждаемом жидким азотом, обычно составляет всего 0,01, то эффективность насоса может быть повышена только за счет оптимизации его геометрии, т. е. повышения коэффициента захвата. Это положение хорошо иллюстрируется сравнением параметров насосов равных габаритов с цилиндрической (см. рис. 4.21, а) и сферической (см. рис. 4.21, б) полостями. При диаметре входных отверстий обоих насосов 80 мм, длине цилиндра 200 мм и диаметре сферы также 200 мм коэффициент захвата первого составил 0,055; тогда как второго (сферического) – 0,26.

Величина коэффициента захвата насоса произвольной формы может быть рассчитана методом Монте-Карло, а для сферической геометрии точный результат дает формула

$$\gamma = 1 - \frac{f}{F} \frac{1-\alpha}{1-(1-\alpha)(1-\frac{f}{F})}, \quad (4.18)$$

где γ – коэффициент захвата насоса; F – площадь внутренней поверхности сферической полости; f – площадь входного отверстия; α – коэффициент прилипания.

Наиболее широко в адсорбционных насосах для охлаждения сорбента используется жидкий азот. Он является наиболее доступным, дешевым и удобным в обращении криоагентом. Однако охлаждения адсорбентов до температуры 77 К явно недостаточно, чтобы эффективно поглощать такие газы, как водород, неон и гелий. В целях уменьшения парциального давления этих газов вакуумные системы перед включением в работу адсорбционных насосов либо «промывают» сухим азотом, вытесняя воздух, либо предварительно вакуумируют, например механическими насосами. В том случае, когда в процессе откачки системы адсорбционным насосом возможно большое газоотделение водорода, его поглощение может быть осуществлено испарительным геттерным насосом.

На рис. 4.24 показана такая комбинированная откачивающая система. Она состоит из корпуса 8, в котором размещен пустотелый цилиндрический сосуд 7 для жидкого азота. На наружной поверхности сосуда расположен адсорбент 5. В центре пустотелого цилиндра смонтированы испаритель геттера 4 и подогреватель 3. С откачивае-

мым объектом система соединяется патрубком 1. Для заполнения сосуда 7 жидким азотом и для выхода паров азота служат трубки 2. Промывка полости насоса и откачиваемого объекта сухим азотом может осуществляться через вспомогательный патрубок с вентилем 6. Путем промывки системы азотом достигают минимальной концентрации в ней неона и гелия. Водород, как активный газ, хорошо поглощается распыляемым геттером. Все остальные газы связываются адсорбентом. Регенерация адсорбента осуществляется при включении подогревателя 3.

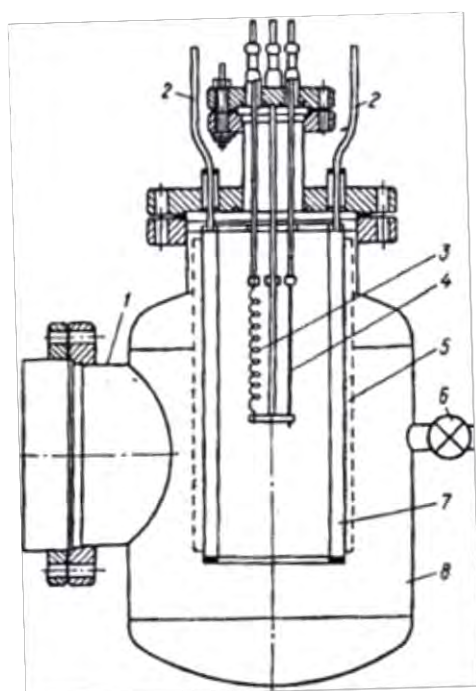


Рис. 4.24. Комбинация адсорбционного и испарительного геттерного насосов:
1 – патрубок; 2 – трубки; 3 – подогреватель;
4 – испаритель геттера; 5 – адсорбент;
6 – вентиль; 7 – сосуд; 8 – корпус

Существенный прогресс в развитии криоадсорбционных вакуумных насосов был достигнут благодаря применению модульного принципа с использованием пористых экранов [7]. Три базовых типа модулей (рис 4.25) позволяют создавать системы с широким спектром рабочих параметров.

Модульный принцип конструирования адсорбционных насосов состоит в том, что любой насос собирается на базе оптимальных

стандартных узлов. Это создает предпосылки для широкого промышленного производства адсорбционных вакуумных насосов. Высокая вариативность конструкций адсорбционных насосов обусловлена множеством возможных конструкций средств тепловой защиты адсорбента и способов организации теплообменной поверхности.

Слабым местом существующих систем является неспособность работать в широком диапазоне давлений. Они эффективны либо в форвакуумной области, либо в высоковакуумной. Другим серьёзным недостатком известных конструкций является то, что они не позволяют использовать порошковые адсорбенты, особенно угольные или цеолитовые.

Пористый экран вместе с криогенной поверхностью образует замкнутые полости, в которые засыпается адсорбент. Экран, изготовленный спеканием порошков металлов, имеет достаточно высокий коэффициент теплопроводности, а соответствующим подбором величины пористости и размера гранул металлического порошка можно добиться достаточно высокой проводимости экрана. Пористый экран имеет с криогенной поверхностью надежные тепловые контакты либо через теплопроводящие ребра, либо путем сварного или паяного контакта.

Теплозащитные свойства экрана обусловлены тем, что в его высокопористой структуре происходит эффективное поглощение тепловой энергии независимо от механизма ее переноса. Экран надежно защищает адсорбент как от тепла, переносимого газом, так и тепла, вызванного излучением. Поэтому он эффективен при любых степенях разрежения, что является одним из основных его достоинств. Благодаря этому качеству насосы с пористыми экранами можно эффективно применять как для форвакуумной, так и для высоковакуумной откачки. Кроме того, пористый экран прижимает адсорбент к криопов поверхности и препятствует распылению адсорбента по вакуумной системе, что открывает возможность использования более дешевых малопрочных гранулированных и порошковых адсорбентов.

Адсорбционным модулем (рис. 4.25) является криосорбционный элемент, состоящий из криогенной поверхности, экрана и адсорбента. Такие модули позволяют создавать насосы с широким спектром откачных характеристик. Варьируя количество модулей, их тип и компоновку, можно получать оптимальные конструкции адсорбционных насосов с гарантированными параметрами откачки.

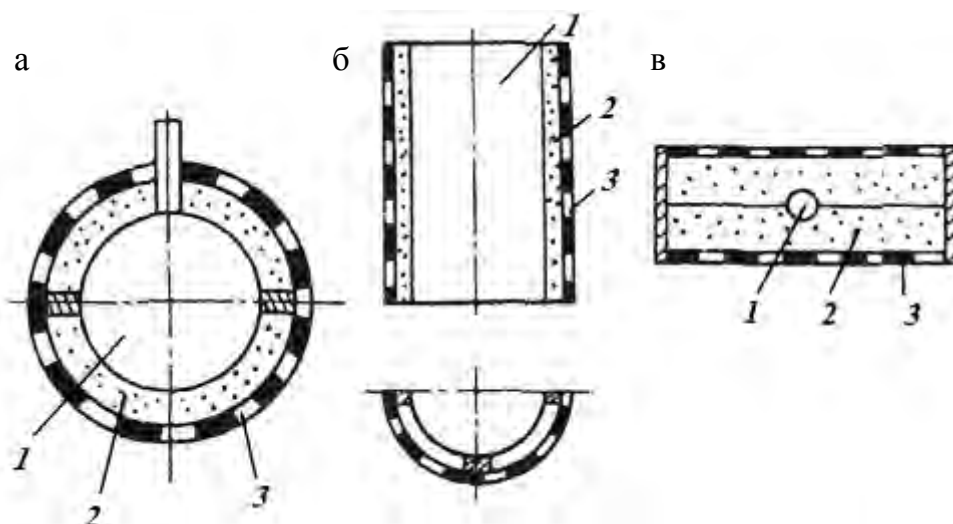


Рис. 4.25. Схемы адсорбционных модулей:

а – сферический; б – цилиндрический; в – плоский;

1 – полость для криоагента; 2 – адсорбент; 3 – пористый экран

4.3.4. Криоконденсационные вакуумные насосы

Криогенные конденсационные насосы являются одним из современных безмасляных средств получения вакуума. В основу их работы положена конденсация в твердое состояние (вымораживание) газов и паров на поверхностях, охлаждаемых до криогенных температур.

Конструктивно крионасос состоит из четырех основных элементов: криопанели-конденсатора, системы защитных экранов, корпуса и системы охлаждения.

Криопанель представляет собой охлаждаемую до криогенных температур поверхность, на которой происходит конденсация откачиваемых газов в твердое состояние (десублимация).

Защитные экраны имеют более высокую температуру, чем криопанель, и служат для защиты последней от теплопритоков со стороны стенок корпуса насоса. Кроме того, на экранах происходит предварительное охлаждение откачиваемого газа.

Корпус предназначен для монтажа конструктивных элементов насоса. Часто криопанель с защитными экранами размещают непосредственно в объекте откачки, в этом случае корпус объекта служит одновременно и корпусом насоса.

Система охлаждения предназначена для отвода теплоты от криопанели и защитных экранов и поддержания их на определенном температурном уровне во время работы крионасоса.

Отсутствие движущихся частей делает конструкции крионасосов простыми и надежными, а отсутствие рабочих веществ позволяет создавать абсолютно «чистый» вакуум. Эти положительные качества крионасосов позволяют им быстро завоевывать прочные позиции в таких отраслях науки и техники, как электроника, металлургия, техника получения сверхчистых и полупроводниковых материалов и многих других. Способность же крионасосов откачивать агрессивные газы и пары позволяет использовать их в химических производствах, для откачки продуктов реакций в плазмохимических реакторах, выхлопов ракет и тому подобных объектов, где все другие средства откачки просто не годятся.

Если предположить, что криоповерхность расположена в среде, в которой скорости молекул распределены согласно закону Максвелла, то из соотношений кинетической теории газов теоретическое значение быстроты действия криооткачки S_T определяется [5] по формуле

$$S_T = \frac{1}{4} F v_a = 36,4 F \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (4.19)$$

где F – площадь поверхности криопанели; T – температура откачиваемого газа; M – молекулярная масса откачиваемого газа.

Как следует из уравнения (4.19), быстрота действия крионасоса не должна зависеть от давления откачиваемого газа и, следовательно, теоретически нет предела для достижения сколь угодно низких значений давления. В действительности же предельный вакуум, создаваемый крионасосом, ограничен упругостью пара p^* откачиваемого газа при температуре поверхности слоя десублимата. С учетом этого обстоятельства теоретическая быстрота действия крионасоса при давлении газа p

$$S'_T = 36,4 F \sqrt{\frac{T}{M}} \left(1 - \frac{p^*}{p} \right). \quad (4.20)$$

Из этого уравнения следует, что если давление газа значительно превышает упругость его пара при температуре десублимата, т. е. когда $p \gg p^*$, быстрота действия крионасоса практически не зависит от значения p . Быстрота действия начинает снижаться лишь при приближении давления в откачиваемом объекте к давлению насыщенного пара и становится равной нулю, когда $p = p^*$. Зависимость упругости паров некоторых газов от температуры показана на рис. 4.26.

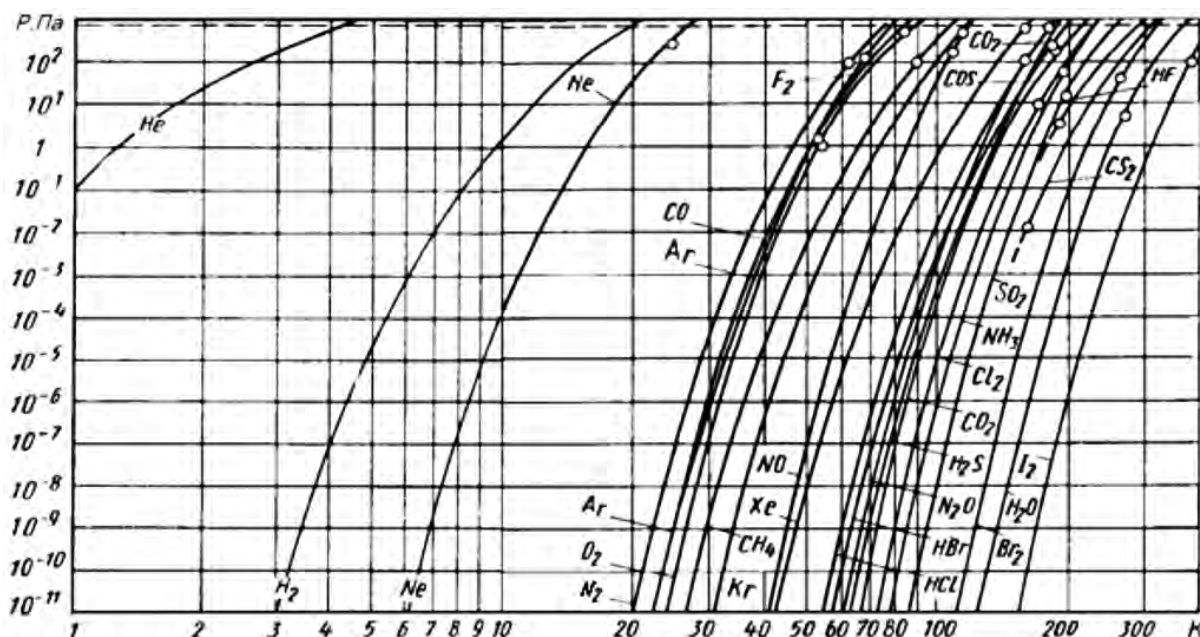


Рис. 4.26. Зависимость упругости паров от температуры

Для расчета быстроты действия крионасоса по уравнению (4.20) необходимо установить значение температуры газа T . Если принять, что все молекулы, падающие на криопанель, конденсируются, то в откачиваемом объеме будут отсутствовать отскочившие от нее «холодные» молекулы. Тогда в уравнение (4.20) можно подставлять значение температуры, равное температуре поверхностей, окружающих криопанель, т. е. температуру корпуса откачиваемого объекта или температуру защитных экранов, если они имеются.

Совершенно очевидно, что конденсация газа на криопанели ведет к нарушению максвелловского распределения молекул по скоростям. Причем, чем интенсивней криопанель отводит из окружающего ее пространства молекулы, тем в большей степени нарушается это распределение и, следовательно, в меньшей мере уравнение (4.20) отвечает реальному процессу откачки.

Таким образом, более или менее точно рассчитать быстроту откачки газа криоповерхностью по уравнению (4.20) можно лишь в том случае, если криоповерхность не вносит заметного возмущения в максвелловское распределение молекул газа по скоростям. Это условие выполняется тогда, когда криоповерхность размещена в объекте, значительно превышающем ее по размерам, а давление настолько низкое, что столкновениями молекул газа между собой

можно пренебречь. Увеличение размеров криповерхности или повышение давления в объекте будет приводить к росту быстроты откачки. В первом случае это связано с появлением направленного движения всей массы газа в сторону криповерхности, а во втором – с появлением градиента давления и газодинамическим разгоном молекул, опять же, в сторону криповерхности.

При работе крионасоса в переходном и, тем более, в вязкостном режиме течения газа криповерхность может вести себя как выходное отверстие звукового сопла или идеальное отверстие, разделяющее области высокого и низкого давлений. В этом случае, вследствие газодинамического разгона, скорость газового потока, набегающего на поверхность конденсации, зависит от отношения давлений p_1/p_0 , где p_0 – давление невозмущенного газа, т. е. на удалении от криповерхности, а p_1 – давление газа непосредственно перед ней. При $p_1/p_0 = 1$ скорость газового потока будет равна нулю, а с уменьшением отношения давлений скорость потока будет возрастать. В пределе, при достижении критической величины отношения давлений

$$\left(\frac{p_1}{p_0} \right)_{\text{кр}} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (4.21)$$

скорость газового потока достигнет скорости звука:

$$\alpha_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0}, \quad (4.22)$$

где $k = c_p/c_v$ – отношение теплоемкости газа; R – газовая постоянная; T_0 – температура торможения газа, т. е. неподвижного газа, вдали от криповерхности.

Произведение скорости газового потока и площади криповерхности дает значение теоретической быстроты действия крионасоса в вязкостном режиме. Таким образом, если для молекулярного режима течения газа максимально возможная теоретическая быстрота действия крионасоса определяется величиной S'_T [см. уравнение (4.20)], то для вязкостного режима

$$S''_T = \alpha_{\text{кр}} F = F \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0}. \quad (4.23)$$

Результаты экспериментального определения зависимости быстроты действия крионасоса от давления откачиваемого газа показаны на рис. 4.27.

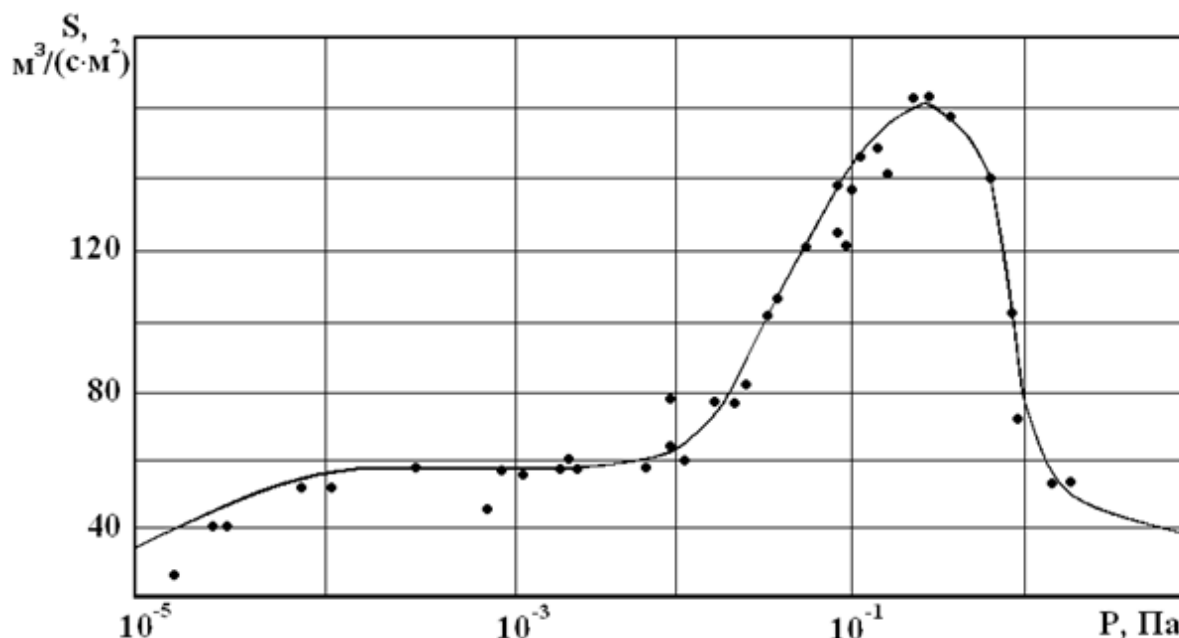


Рис. 4.27. Зависимость удельной быстроты действия крионасоса от давления откачиваемого газа

В данном случае криопанелью, охлаждаемой жидким азотом (77 K), откачивался диоксид углерода, имеющий температуру 300 K. Совершенно очевиден рост быстроты действия крионасоса при переходе от молекулярного режима течения газа к вязкостному. Вместе с тем следует отметить, что как в молекулярном, так и в вязкостном режимах быстрота действия крионасоса не достигала теоретических значений, определяемых уравнениями (4.20) и (4.23). Это обусловлено тем, что не все молекулы CO_2 , сталкивающиеся с холодной поверхностью криопанели, прилипают к ней сразу же, при первом столкновении. В результате действительная быстрота откачки несколько меньше теоретических значений. Кроме того, весьма неустойчивой оказывается криооткачка при повышенном давлении, когда ее скорость резко падает. Чтобы учесть в расчетах указанное снижение быстроты откачки, в уравнения (4.20) и (4.23) требуется ввести корректирующий коэффициент – так называемый коэффициент прилипания

$$\alpha = 1 - \frac{n_t}{n_i}, \quad (4.24)$$

где n_i – число молекул, падающих на криповерхность; n_t – число молекул, отраженных и сублимированных за тот же период времени с той же поверхности.

Обычно в емкое понятие коэффициента прилипания вкладывают всю сложность механизма конденсации и влияния различных факторов на ход этого процесса. С учетом данного коэффициента уравнения быстроты действия принимают следующий вид:

– для молекулярного режима течения газа

$$S'_o = 36,4\alpha F \sqrt{\frac{T}{M} \left(1 - \frac{p^*}{p}\right)}; \quad (4.25)$$

– для вязкостного режима

$$S''_o = \alpha F \xi \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \xi^2\right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (4.26)$$

В уравнении (4.26) коэффициент скорости

$$\xi = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left\{ 1 - \left[1 - \alpha \left[1 - \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \right] \right]^{k-1} \right\}}. \quad (4.27)$$

Из уравнений (4.26) и (4.27) следует, что скорость газа перед криповерхностью меняется в пределах от $a_{кр}$ до нуля, достигая критической звуковой скорости лишь в идеале, когда $\alpha = 1$. При этом необходимо иметь в виду, что в уравнении (4.26) быстрота криооткачки приведена к параметрам заторможенного газа. При разгоне газа до скорости $a_{кр}$ его плотность уменьшается в $[(k+1)/2]^{1/k-1}$ раза по сравнению с плотностью заторможенного газа.

Из сказанного совершенно очевидно, что основная трудность расчета крионасосов сводится к определению коэффициентов прилипания. Имеющиеся результаты экспериментального исследования процесса криооткачки основных компонентов воздуха и найденные коэффициенты прилипания очень разноречивы. В табл. 4.4 приведены для примера усредненные значения относительной быстроты дей-

ствия криогенного конденсационного насоса и усредненные значения коэффициента прилипания при откачке некоторых газов [8].

Таблица 4.4

Усредненные значения относительной быстроты действия крионасоса S_{δ} [$\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$] и коэффициента прилипания α

Температура газа, К	77				293				
Температура криопанели, К	4,2	10	15	20	3,4	4,2	10	15	20
H_2	136	–	113	90	221	44	–	–	–
	0,6	–	0,5	0,4	0,5	0,1	–	–	–
CH_4	80	80	80	80	–	–	–	–	–
	1,0	1,0	1,0	1,0	–	–	–	–	–
N_2	60	60	58	51	–	77	77	73	72
	1,0	1,0	0,96	0,84	–	0,65	0,65	0,68	0,61
Воздух	59	59	–	46	81	80	80	79	78
	1,0	1,0	–	0,78	0,7	0,69	0,69	0,68	0,67
Ar	51	51	51	51	98	69	67	66	65
	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,7	0,68	0,67	0,66
CO_2	48	48	48	48	–	–	71	63	60
	1,0	1,0	1,0	1,0	–	–	0,76	0,67	0,64

Анализируя данные табл. 4.4, можно прийти к выводу, что повысить коэффициент прилипания можно охлаждением криопанели до более низкой температуры. Тем не менее, даже понижая температуру до гелиевого уровня, не всегда удастся добиться значительного повышения коэффициента прилипания.

Более действенный путь повышения эффективности криопанелей предусматривает замену охлаждаемых пластин панелями сложной геометрии. Криопанели простой геометрии (плоскость, шар) не могут иметь эффективность откачки выше, чем это обусловлено коэффициентом прилипания, так как все несконденсировавшиеся при первом соударении молекулы возвращаются в откачиваемый объем. Если же конструкция криопанели такова, что отскочившие при первом соударении с холодной поверхностью молекулы снова попадают на нее, то вероятность захвата молекул возрастает и повышается эффективность откачки. Поскольку в этом случае молекулы претерпевают многократные столкновения с холодной поверхностью панели, то для характеристики ее эффективности следует пользоваться уже не коэффициентом прилипания, а более общим для данной конструкции коэффициентом захвата, который учитывает помимо всего прочего геометрическую форму и размеры панели.

Исследование эффективности криопанелей различного устройства (рис. 4.28) показало, что в случае откачки газа с максвелловским распределением молекул по скоростям наибольшим коэффициентом захвата обладает ячеистая панель. При откачке CO_2 ее эффективность оказалась в 1,36, а при откачке N_2 – в 1,1 раза выше эффективности криопанели, выполненной в виде плоской пластины [5].

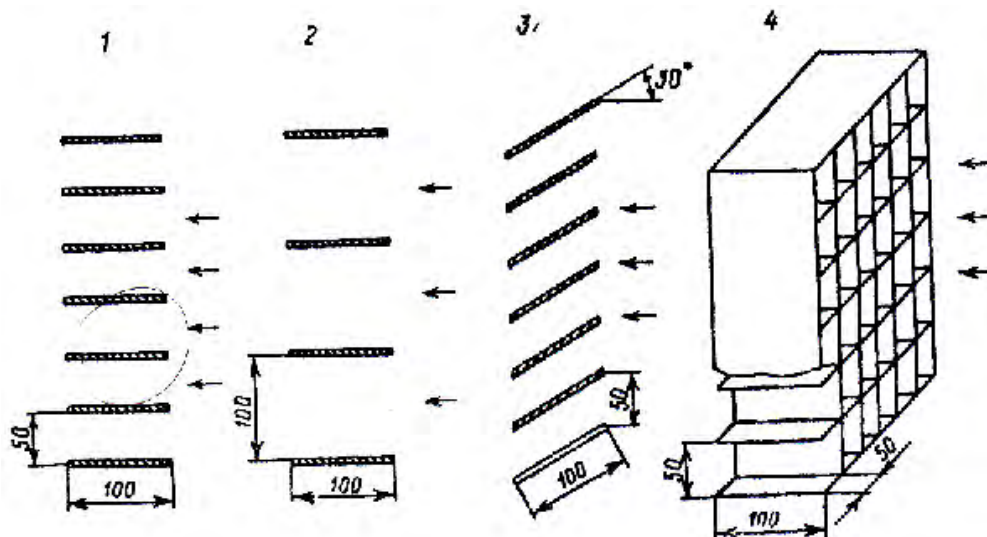


Рис. 4.28. Разновидности схем расположения пластин в криопанелях

Применение ячеистых панелей в газодинамических установках позволяет повысить эффективность откачки еще более существенно, особенно если коэффициент прилипания мал. Высокие значения коэффициентов захвата ячеистых криопанелей в случае откачки направленных потоков обусловлены следующим обстоятельством. Если оси отдельных ячеек криопанели расположены таким образом, что совпадают с линиями тока струи откачиваемого газа, то большинство молекул пройдет вглубь ячеек без столкновений с их стенками. Даже если молекулы не сконденсировались при столкновении, скажем, с дном ячейки, то их возврат ко входному отверстию весьма затруднен. Отражение от стенок носит диффузный характер, поэтому лишь очень незначительная часть молекул может преодолеть обратный путь через канал ячейки без множества столкновений со стенками. Поскольку стенки ячейки – холодные, каждое соударение молекулы с ними приводит к потере молекулой своей энергии, что повышает вероятность ее конденсации.

На рис. 4.29 сравниваются вероятности прохода молекул вглубь ячейки, когда они движутся хаотично (тепловое движение) и когда им придана направленность движения вдоль оси ячейки. Ячейка представляет собой цилиндрическую трубу. В случае, когда газ максвелловский, наибольшее число первых столкновений молекул со стенками происходит вблизи входного отверстия. Так, 60 % всех вошедших в ячейку молекул сталкиваются с ее стенками на расстоянии одного радиуса ячейки от входного отверстия. Если коэффициент прилипания при первом столкновении мал, то значительная часть молекул отразится от стенок. Поскольку отражение диффузное, есть большая вероятность того, что молекулы покинут ячейку и вернуться в откачиваемый объем.

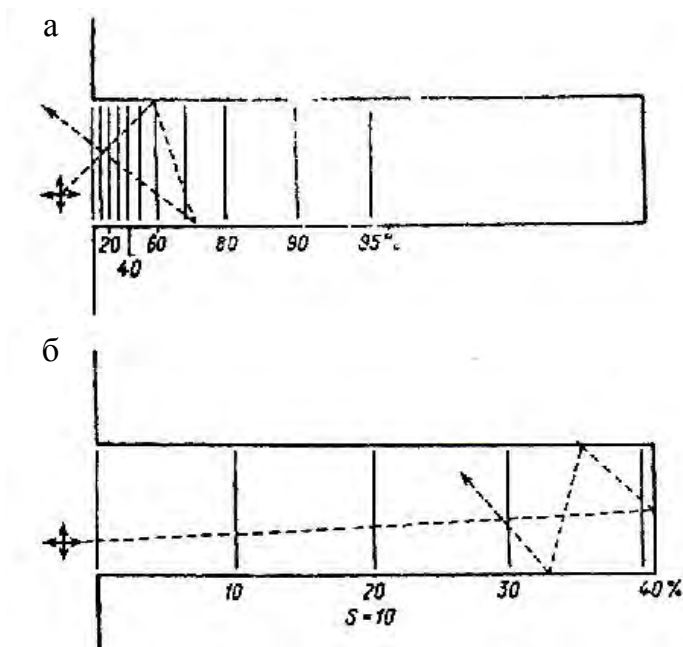


Рис. 4.29. Характер прохода молекул газа через цилиндрический канал при произвольном (а) и направленном (б) потоках. Вертикальные линии указывают процент вошедших в канал молекул, имевших столкновение со стенками

Увеличение длины ячейки быстро становится малоэффективным. Практически все вошедшие молекулы столкнутся со стенками на длине в два диаметра ячейки, поэтому для увеличения коэффициента захвата нет смысла делать ячейки большей длины. Совсем иное дело, когда поток молекул имеет направленное движение вдоль оси ячейки. При большом отношении скорости направленного движения молекул к их тепловой скорости, например при $w/c = 10$, распределе-

ние первых соударений молекул, вошедших в ячейку, будет практически равномерным на длине в несколько диаметров. Таким образом, снижается число столкновений вблизи входного отверстия и, следовательно, увеличивается вероятность захвата молекул газа ячейкой.

Задача повышения коэффициента захвата молекул криопанелью стоит на первом месте при разработке всех крионасосов, работающих в режиме свободномолекулярного течения газа. Для переходного режима, тем более для вязкостного, на первый план может выйти задача обеспечения теплосъема на границе стенки криопанели–криоагент. Дело в том, что при использовании жидких криоагентов значение допустимой плотности теплового потока лежит в пределах $1\text{--}10\text{ Вт/см}^2$ при температурном напоре в несколько градусов. Превышение допустимых тепловых нагрузок приводит к переходу кипения из пузырькового режима в пленочный, когда между стенкой и жидкостью появляется сплошная паровая прослойка. При переходе к пленочному режиму кипения криоагента возможный теплосъем снижается до $2\text{--}3\text{ Вт/см}^2$, а разность температур стенки и жидкости возрастает до десятков градусов. Естественно, что для обеспечения работы крионасосов представляет интерес лишь режим пузырькового кипения. Поэтому для повышения коэффициента захвата криопанели в ряде случаев приходится больше заботиться о том, чтобы развить поверхность теплообмена со стороны криоагента, а не со стороны конденсации.

Каждое конкретное применение криоконденсационного метода откачки накладывает свои особенности на конструктивную схему насоса. Большое разнообразие схем обусловлено многими факторами: температурным уровнем, рабочим давлением, составом откачиваемого газа, ресурсом работы, способом охлаждения и т. п.

В отличие от форвакуумных насосов высоковакуумные криоконденсационные насосы требуют более тщательного экранирования от теплового излучения, поскольку оно во многом определяет предельно достижимое разрежение. Известно, что в металлических вакуумных системах водород является основным компонентом остаточных газов и откачка его конденсационным методом требует использования в качестве криоагента жидкого гелия. В этой связи проблема экранирования связана не только со снижением расхода дорогостоящего криоагента, но и с тем фактором, что водород легко сублимируется со скоростью, пропорциональной количеству поступающей на криоповерхность радиации.

Второй особенностью высоковакуумного криоконденсационного насоса является жесткое требование к изотермичности поверхности конденсации. Дело в том, что снижение уровня гелия в контейнере конденсатора приводит к повышению температуры верхней его части. Ранее сконденсировавшийся на этой поверхности газ сублимируется и вновь откачивается более холодными частями криопанели. Такая переконденсация газа приводит к снижению предельно достижимого разрежения и увеличивает время, необходимое для его достижения. Удачной конструкцией в этом плане можно считать высоковакуумный наливной гелиевый крионасос (рис. 4.30).

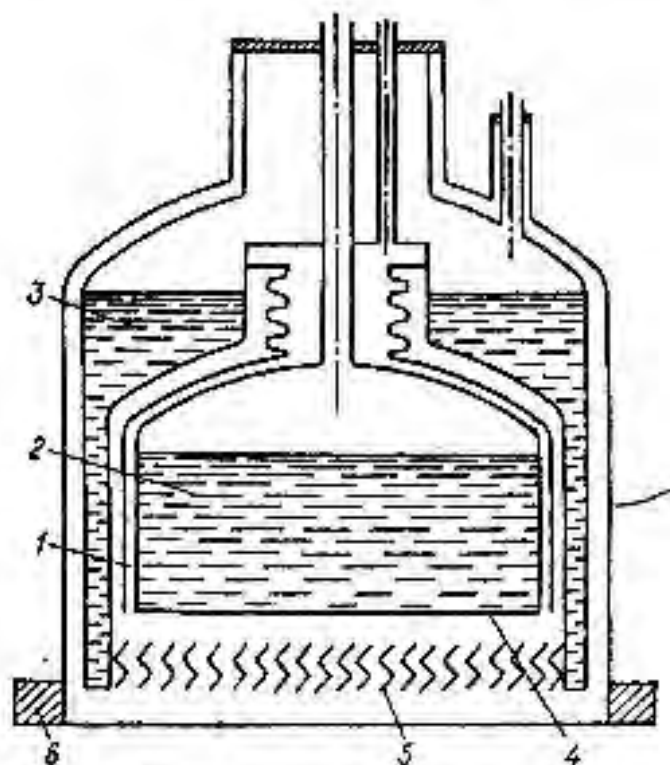


Рис. 4.30. Высоковакуумный криоконденсационный насос:

1 – криопанель; 2 – жидкий гелий; 3 – жидкий азот;

4 – днище; 5 – охлаждаемая ловушка; 6 – фланец

Контейнер для жидкого гелия 2 изготовлен из нержавеющей стали. Поверхностью конденсации является лишь его днище 4. Для того чтобы свести к минимуму переконденсацию газов при изменении уровня жидкого гелия, контейнер имеет двойные стенки, пространство между которыми вакуумируется. Гелиевый контейнер смонтирован концентрично внутри контейнера с жидким азотом 3. Поверхность конденсации экранирована охлаждаемой ловушкой шевронного типа 5. Для снижения теплопритока излучением и для

получения наименьшего равновесного давления водорода поверхность конденсатора покрыта пленкой серебра, а алюминиевые пластины шевронной ловушки анодированы. Такой насос крепится к откачиваемому объекту с помощью фланца *б* и может более месяца работать без дозаправки гелием, обеспечивая вакуум ниже 10^{-8} Па. Наливной криоконденсационный насос (см. рис. 4.30) весьма удобен и достаточно экономичен для поддержания сверхвысокого вакуума. В области же среднего вакуума, при значительных тепловых нагрузках на криопанель, желательно использовать холод отходящих паров криоагента. Наиболее радикально этот вопрос решается путем монтажа холодопроизводящей установки непосредственно в откачиваемом объекте [5]. В этом случае практически полностью используется вся холодопроизводительность криогенной установки, а также устраняются потери, связанные с транспортированием и хранением криоагента. На рис. 4.31 показан пример такой конструкции.

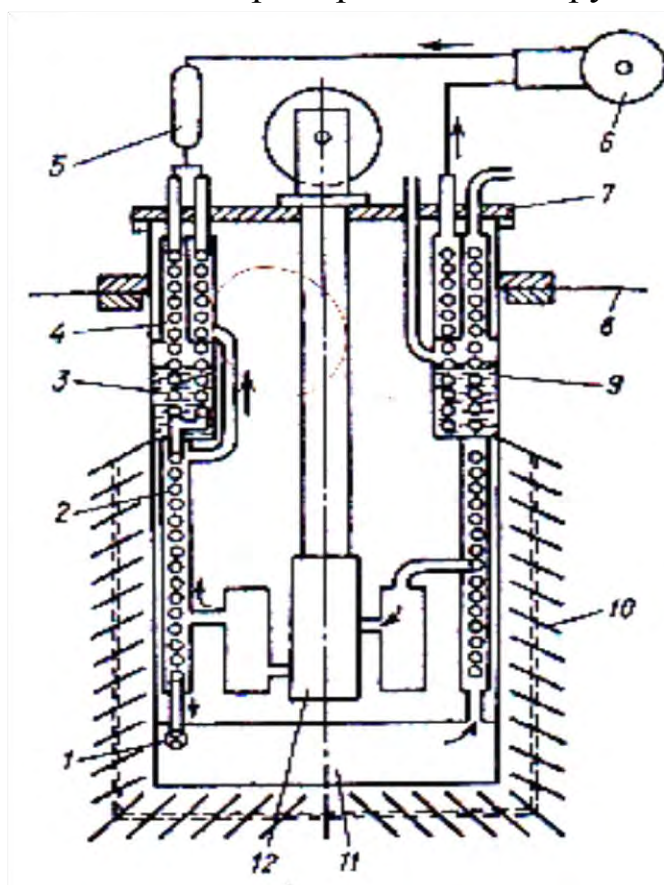


Рис. 4.31. Встроенный крионасос

с автономным охладителем рефрижераторного типа:

1 – дроссель; *2, 4* – теплообменники; *3* – азотная ванна; *5* – блок очистки;
6 – компрессор; *7* – фланец; *8* – откачиваемая камера; *9* – кожух; *10* – защитный экран; *11* – полость; *12* – детандер

В кожухе 9, изготовленном из материала с низкой теплопроводностью, например из нержавеющей стали, размещены теплообменные аппараты и детандер гелиевого ожижителя, работающего в рефрижераторном режиме. Сам кожух вставлен в откачиваемую камеру 8, а вход и выход коммуникаций, связывающих ожижитель с компрессором 6, осуществлен через фланец 7. Сжатый в компрессоре 6 гелий проходит последовательно блок очистки 5, противоточный теплообменник 4, азотную ванну 3, теплообменник 2 и затем часть его расширяется в детандере 12. Остальная часть гелия проходит последний теплообменник и дросселируется в полость 11. При расширении газа в дросселе 1 он частично ожижается. Жидкий гелий кипит в полости 11, а пары через указанные теплообменники возвращаются обратно на всасывание в компрессор, охлаждая встречный поток сжатого газа. В этот обратный поток поступает также холодный гелий после детандера. Таким образом, внешняя поверхность полости 11 поддерживается при температуре жидкого гелия и является поверхностью конденсации откачиваемого газа. Для снижения теплопритоков она окружена защитным экраном 10, имеющим тепловой контакт с ванной жидкого азота 3.

Весьма перспективна разработка крионасосов на базе газовых криогенных машин. Применение указанных криогенных систем открывает большие возможности в создании малогабаритных, автономных и эффективных устройств откачки. Причем для этих целей могут быть использованы как машины, работающие по обратному циклу Стирлинга, так и машины, построенные по принципу низкотемпературного теплового насоса.

Двухступенчатый криогенератор Стирлинга и схема установки на нем элементов крионасоса показаны на рис. 4.32.

Машина имеет одну полость сжатия газа над поршнем 10, две полости 6 и 3 расширения на различных температурных уровнях, два регенератора 8 и 5 и вытеснитель 2 в виде дифференциального поршня. Из полости сжатия газ, обычно гелий, поступает в водяной холодильник 9, затем проходит в регенератор 8. Далее под напором поступающего газа столб газа, заполняющий все вышележащее пространство, как бы смещается вверх, при этом уплотняясь. Поступая в полости расширения, газ проходит теплообменники 4 и 7, образованные ребрами головки машины. Расширяющийся в первой ступени (полость 6) газ создает холод, идущий на покрытие всех потерь на

уровне 80–100 К и на охлаждение защитных экранов *16* крионасоса, имеющих тепловой контакт с ребрами теплообменника *7*. При расширении во второй ступени (полость *3*) создается полезный холод на уровне 20 К, который идет на охлаждение пластин конденсатора в результате их теплового контакта с ребрами теплообменника *4*. Применение уравнивающего поршня *1* и маховика *11* позволило снизить уровень вибрации до ~30 микрон. Машина не требует фундамента и может устанавливаться без крепления к полу.

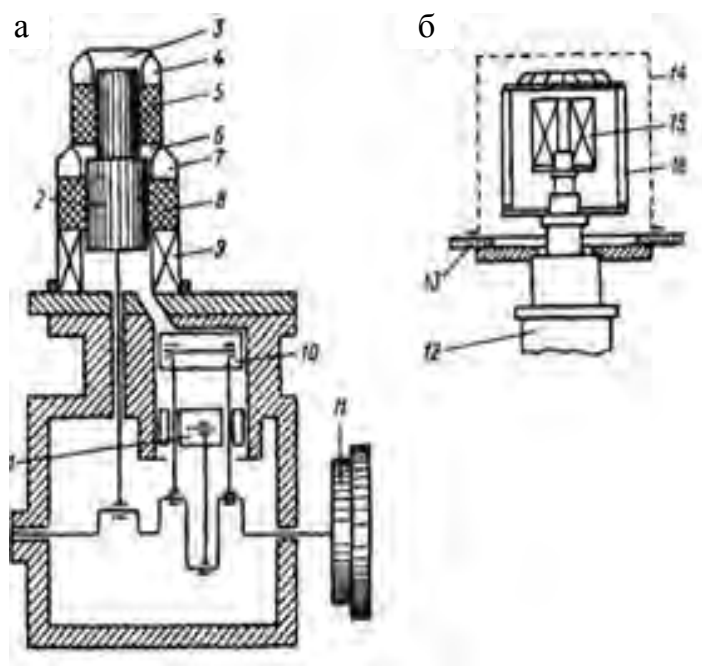


Рис. 4.32. Крионасос на базе ГKM:

- а – газовая холодильная машина: *1* – уравнивающий поршень;
2 – вытеснитель; *3*, *6* – полости расширения; *4*, *7* – теплообменники;
5, *8* – регенераторы; *9* – водяной холодильник; *10* – поршень; *11* – маховик;
б – схема крионасоса: *12* – ГKM; *13* – корпус откачиваемой камеры;
14 – герметичный колпак; *15* – криопанель; *16* – теплозащитный экран

5. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Принципы, на основании которых в вакуумной технике подходят к выбору материалов, и способы их обработки существенно отличаются от принятых в других областях. Так, при выборе материала необходимо знать давление его насыщенных паров, способность к поглощению или выделению газа и другие характеристики.

Рассмотрим основные требования, которым должны удовлетворять материалы, используемые в вакуумной технике.

1. Высокая вакуумная плотность при минимальной толщине материала. Все материалы, применяемые в вакуумной технике, должны обладать высокой вакуумной плотностью, т. е. минимальной проницаемостью газов и паров через стенки, ограничивающие вакуумный объем. При этом предполагается, что материал не имеет каких-либо щелей, микротрещин и других случайных дефектов.

Проницаемость материалов сильно зависит от рода газа: серебро наиболее проницаемо для кислорода; никель – для водорода; резина – для гелия, водорода, азота; кварцевое стекло – для гелия. Например, если колбу из плавленого кварца длиной 5 см и диаметром 2 см со стенками толщиной 1 мм откачать до давления $1 \cdot 10^{-7}$ Па и отпаять ее, то через сутки давление в колбе вследствие проницаемости через стенки, главным образом гелия, возрастает до $1 \cdot 10^{-4}$ Па.

2. Низкое давление насыщенных паров материала при рабочей температуре. Для того чтобы пары материала не распылялись и не ухудшали вакуум, их концентрация в вакуумном объеме должна быть мала по сравнению с концентрацией молекул оставшихся газов. Следовательно, давление насыщенных паров применяемых материалов должно быть значительно меньше давления остаточных газов. Так, если деталь изготовлена из латуни и во время работы подвергается нагреву до температуры 773 К в вакууме, то входящий в латунь цинк полностью испарится, что приведет не только к загрязнению системы парами цинка, но и к выходу из строя самой детали.

Для иллюстрации в табл. 5.1 приведено давление паров некоторых материалов при температуре 293 К и 773 К [4].

3. Наименьшее газовыделение в вакууме и легкость обезгаживания. Свойство материалов растворять в себе или связывать на своей поверхности газы оказывает существенно влияние на процессы получения высокого и, особенно, сверхвысокого вакуума, даже если мате-

риалы обладают достаточной вакуумной плотностью и низким давлением насыщенных паров.

Таблица 5.1

Давление паров материалов при различных температурах, Па

Материал	Температура, К		Материал	Температура, К	
	293	773		293	773
Ртуть	10^{-1}	10^6	Олово,	—	10^{-8}
Цинк	10^{-12}	10^2	алюминий		
			Медь, золото	—	10^{-9}

Газовыделение зависит как от материала, его рабочей температуры, истинной поверхности, так и от предшествующей технологической обработки. Для уменьшения газовыделения обычно применяют высокотемпературный прогрев (700–900 К) с одновременной откачкой вакуумного объема до давления 10^{-4} Па.

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 10, сталь 45, сталь 40Х 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, хромируют или никелируют. Эти материалы не рекомендуется применять при температуре ниже 173 К.

Коррозионно-стойкие стали (сталь 2Х13, 12Х18Н10Т и др.) являются основным материалом, из которого изготавливаются высоковакуумные и сверхвысоковакуумные системы. Эти стали хорошо обезгаживаются прогревом, превосходно свариваются аргоно-дуговой и электронно-лучевой сварками, паяются мягкими и твердыми припоями и обычно применяются при температуре не выше 1200 К.

Медь (М1, М3) является основным материалом для изготовления корпусов многих типов криостатов, уплотнительных элементов коммутирующей аппаратуры, теплообменников, токовводов и т. п. Медь обладает очень большой электро- и теплопроводностью, высокой вакуумной плотностью даже при весьма малой толщине стенок.

Латунь (Л68, ЛС 59-1) в вакуумной технике имеет ограниченное применение из-за летучих примесей, главным образом цинка, который при нагревании латуни легко испаряется, загрязняя вакуумную систему и постепенно превращая латунь в пористый материал.

Алюминий (АД1) и его сплавы часто используются для изготовления уплотнителей в разборных соединениях. Для сварки соединений применяют алюминиевые сплавы АМц или АМг-6, обладающие большой механической прочностью.

Ковар (сплав железа, никеля и кобальта), имеющий коэффициент теплового расширения примерно 10^{-7} К^{-1} , весьма близкий к коэффициентам теплового расширения некоторых сортов стекла, применяется главным образом для спая стекла с металлом.

К неметаллическим материалам относятся главным образом стекло, керамика, резина и некоторые синтетические материалы.

Стекло выгодно отличается от других материалов такими свойствами, как прозрачность, электроизолирующие свойства, легкость обезгаживания.

Керамика используется в сверхвысоковакуумных системах для высоковольтных тоководов. Она прочна, обладает высоким электрическим сопротивлением.

Вакуумные резины нашли широкое применение главным образом в качестве уплотнителей в разъёмных соединениях. Прогрев таких соединений недопустим, так как в этом случае из резины выделяются газообразные, жидкие и твердые продукты.

Фторопласт-4 обладает широким рабочим температурным диапазоном (от 77 до 520 К) и малым собственным газовыделением (в 10 раз меньше, чем у лучших сортов вакуумной резины). По стойкости к химически активным веществам он превосходит золото и платину. Однако фторопласт-4 имеет малую упругость, большую остаточную деформацию и текучесть.

6. ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Разъемные соединения с неметаллическими уплотнениями просты в изготовлении и надежны в эксплуатации, не требуют больших усилий для уплотнения, но имеют ограниченную термическую устойчивость и, как правило, высокую упругость паров уплотнителя, вследствие чего они применяются лишь при давлениях не ниже $5 \cdot 10^{-5}$ Па.

Разборные соединения (рис. 6.1) должны конструироваться таким образом, чтобы резиновый уплотнитель не воспринимал механических нагрузок и не влиял на точность установки соединяемых деталей. Поскольку резина несжимаема, то следует предусматривать место для ее растекания при деформации. Объем канавки выполняется равным объему резины или несколько большим (на 2–5 %). Уплотнительные кольца вырезаются из резиновых пластин или склеиваются из шнура прямоугольного либо круглого сечения.

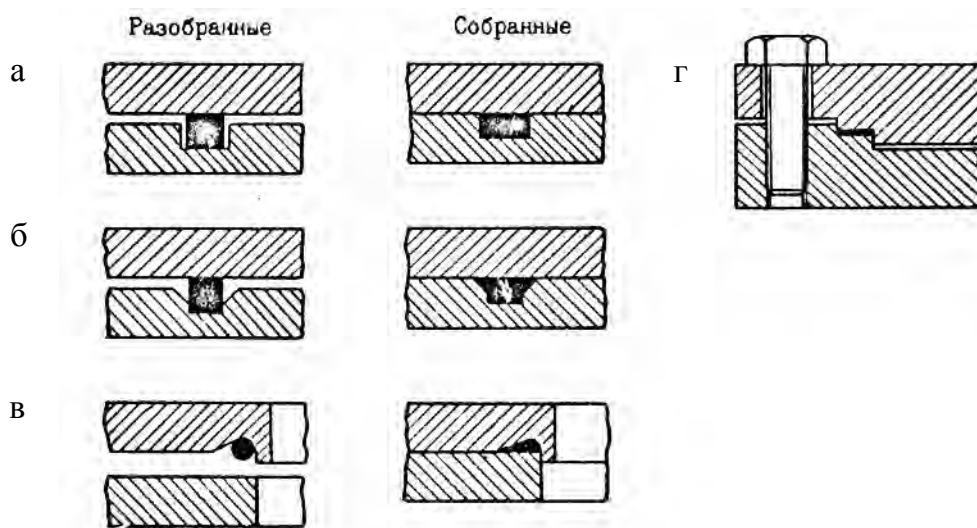


Рис. 6.1. Различные соединения с неметаллическими уплотнителями

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

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

На рис. 6.1, г показано высоковакуумное уплотнение для низких температур, где в качестве уплотнителя используется фторопласт-4. Из-за высокой текучести этого уплотнителя радиальные зазоры между фланцами должны быть минимальными (меньше 0,05 мм). Толщина прокладки 0,1–0,15 мм. Фланцы и болты должны быть из одного материала, например бронзовые. Такие уплотнения позволяют иметь вакуум в системе 10^{-3} – 10^{-4} Па при многократном охлаждении до температуры 1,5 К.

В лабораторной практике для присоединения форвакуумного насоса к трубопроводу часто используется резиновый вакуумный шланг (рис. 6.2). Желательно концы трубопроводов на длину 1,5–2,0 диаметра расточить, как показано на рисунке. Для выполнения соединения используют резиновый шланг, внутренний диаметр которого в полтора раза меньше внешнего диаметра трубопровода, а длина составляет 4–6 диаметров трубопроводов.

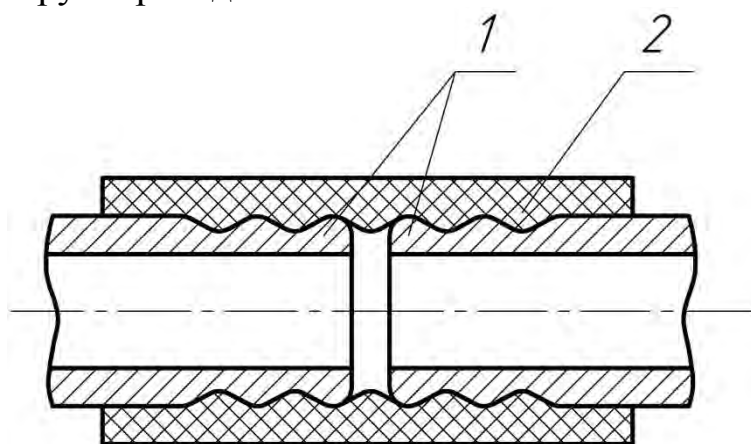


Рис. 6.2. Соединение трубопроводов с помощью резинового вакуумного шланга:
1 – трубопровод; 2 – шланг

Разъемные соединения с металлическими уплотнителями предназначены для применения в системах с давлением ниже $5 \cdot 10^{-5}$ Па. Они должны выдерживать во время обезгаживания длительные и многократные прогревы до температуры 500–900 К.

Металлические уплотнительные прокладки практически исключают проникновение газов через материал уплотнителя, а газо-выделение их примерно в 10^3 раза меньше, чем у лучших сортов вакуумных резин. Примеры соединений с металлическими уплотнителями показаны на рис. 6.3.

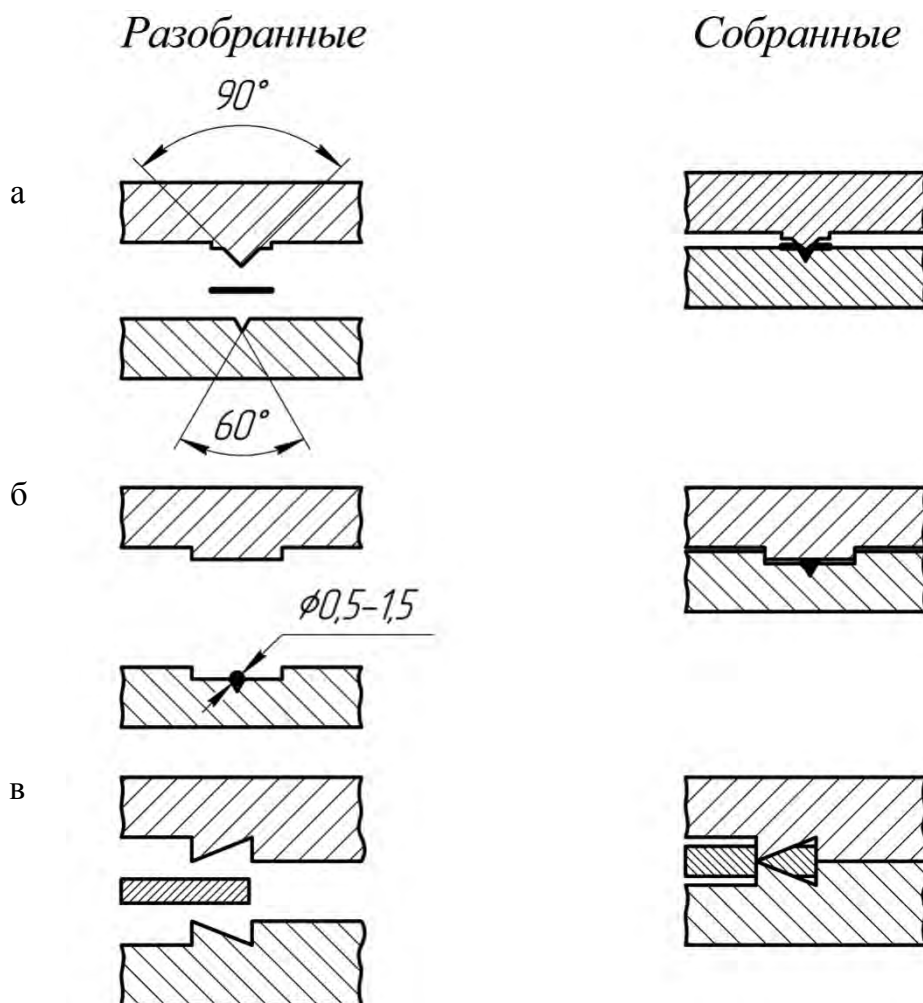


Рис. 6.3. Различные соединения с металлическими уплотнителями

В качестве уплотнителя применяют алюминий и медь. Уплотнительные прокладки из алюминия допускают прогрев до 600 К. Толщина алюминиевой прокладки должна быть не более 0,3 мм из-за

большого коэффициента термического расширения алюминия. Уплотнительные прокладки из меди допускают прогрев до 900 К.

В заключение следует указать, что все металлические уплотнения надежно работают лишь при близких значениях коэффициентов термического расширения всех элементов соединения, мало отличающихся температурах стягиваемых фланцев и отсутствии их коробления.

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

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

Другие элементы вакуумных систем. Коммутирующие трубопроводы изготавливают из стекла, но чаще всего – из металлических бесшовных цельнотянутых труб. Трубопроводы могут также изготавливаться из керамических, резиновых и синтетических материалов. Тонкостенные трубопроводы из мягкого материала армируются металлической проволокой.

Ввод движения в вакуумный объем осуществляется либо с помощью полированный штоков, уплотняемых фторопластом-4 или резиной, либо с применением металлических сильфонов или резиновых диафрагм.

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

Принципиально любой электрический вакуумный ввод (рис. 6.4) состоит из токоввода 1 и изолятора 2, который электрически изолирует токоввод от корпуса 3 вакуумной камеры.

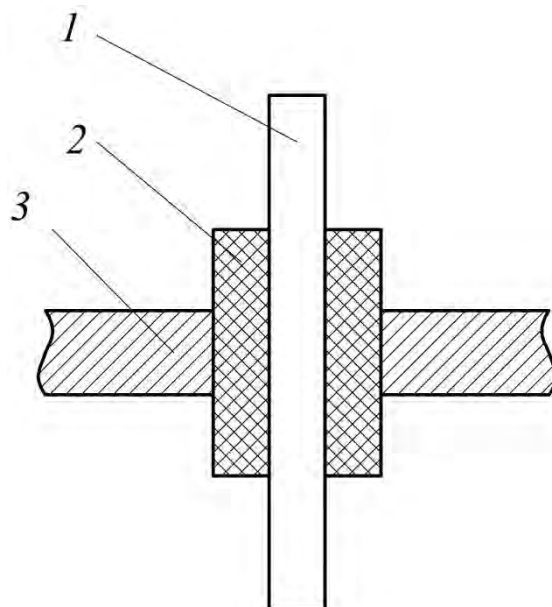


Рис. 6.4. Принципиальная схема электрического вакуумного ввода:
1 – токоввод; 2 – изолятор; 3 – корпус

В стеклянных и металлокерамических приборах роль изолятора и корпуса совпадает.

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

7. НЕКОТОРЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

В процессе расчета вакуумных систем чаще всего решают следующие задачи: либо определяют быстроту действия насоса, обеспечивающего создание в объекте заданного вакуума в течение определенного времени, либо находят время, необходимое для достижения заданного вакуума при известной скорости действия вакуумного насоса.

Откачка газа из объекта – это нестационарный процесс, при котором давление в объекте меняется во времени. Точный его расчет представляет огромные трудности, поскольку невозможно корректно оценить такие величины, входящие в расчет, как зависимость от давления скорости действия насоса, интенсивность газовых выделений, проводимость трубопроводов и др.

С точностью, достаточной для практических целей, расчет вакуумных систем может производиться при допущении о квазистационарности течения газа, что подразумевает переменный режим откачки для всего периода вакуумирования, но в каждый малый интервал времени процесс принимается стационарным. Таким образом, когда газовыделение в объекте ΣQ_i и скорость действия насоса S_n меняются в процессе откачки, весь период откачки разбивают на отдельные участки по давлению, внутри каждого из которых газовыделение, натекание, режим течения газа и скорость действия насоса можно условно принимать постоянными. При этом общая продолжительность откачки

$$\tau = \sum_{i=1}^{i=n} \tau_i, \quad (7.1)$$

где n – число участков, на которые разбит весь период откачки; τ_i – продолжительность откачки на i -м участке.

Продолжительность откачки на i -м участке рассчитывают по формуле

$$\tau_i = V \left(\frac{1}{k_n S_n} \ln \frac{p_n - p_{np}}{p_k - p_{np}} \right), \quad (7.2)$$

где V – объем камеры (все остальные величины взяты для конкретного i -го участка откачки); k_n – коэффициент использования насоса;

S_n – быстрота действия насоса; p_n – начальное давление в камере; p_k – конечное давление в камере; $p_{пр}$ – предельное давление в камере.

Предельное остаточное давление в камере

$$p_{iпр} = \left(\frac{\sum Q_i}{k_n S_n} \right). \quad (7.3)$$

Давление в камере в текущий момент времени определяется балансом между потоком откачиваемого газа и потоком, поступающим в откачиваемый объект. Последний состоит из газовыделения $Q_{i\text{газ}}$ стенок камеры и изделий, находящихся в ней, а также потока газа $Q_{i\text{нат}}$, натекающего в камеру из атмосферы:

$$\sum Q_i = Q_{i\text{газ}} + Q_{i\text{нат}} = p_0 S_0. \quad (7.4)$$

Источники газа в вакуумируемом объекте

В процессе вакуумирования объекта из него удаляются:

1. Газ, находящийся в свободном состоянии $G = V(p_n - p_k)$, где V – объем объекта, p_n и p_k – давление до и после вакуумирования.
2. Поток Q_n , обусловленный натеканием газа извне вследствие негерметичности разъемных соединений, вводов, сварных швов, дефектов в конструкционных материалах.
3. Поток Q_d , обусловленный десорбцией газов с внутренних поверхностей стенок камеры и с поверхностей оборудования, размещенного в ней.
4. Поток Q_r , возникающий в результате выделения газов, растворенных в конструкционных материалах.
5. Поток $Q_{п}$ – разновидность натекания газа в объект из атмосферы вследствие проницаемости ограждающих стенок камеры.

Плотность потока, отнесенная к единице площади поверхности,

$$q = \frac{\sum Q}{F}, \quad (7.5)$$

где q – плотность потока, Па·м³/(м²·с) или Вт/м²; F – площадь поверхности, м².

Кроме перечисленных выше, источниками газа могут быть газовыделения технологического характера, обратный поток из насоса в объект и ряд других.

Натекание газа

Характерным признаком натекания газа из атмосферы является повышенное парциальное давление азота, кислорода и аргона. В случае негерметичности системы охлаждения, размещенной в объекте, наблюдается повышение парциального давления применяемого криоагента – гелия или азота. Кроме того, наличие течи проявляется в равномерном росте давления в объекте, изолированном от насоса.

За одинаковый небольшой промежуток времени Δt парциальное давление одного из указанных выше газов увеличивается на одну и ту же величину Δp_i . Количественно величину натекания из атмосферы в предварительно прогретую и откакумированную камеру можно определить по росту парциального давления газа N_2 :

$$Q_n = \frac{V(p_k^{n_2} - p_n^{n_2})}{0,78\tau}, \quad (7.6)$$

где V – объем камеры; $p_k^{n_2}$, $p_n^{n_2}$ – давление в начале и в конце испытания; τ – продолжительность испытания.

Современные средства течеискания позволяют обнаруживать минимальные течи следующего порядка:

1. Опрессовка – $10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.
2. Галогенный течеискатель – $10^{-6} - 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.
3. Масс-спектрометрический течеискатель – до $10^{-12} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Десорбция газов с поверхностей

Внутренние поверхности стенок объекта при воздействии атмосферного воздуха адсорбируют значительное количество газов и паров, покрываясь, по крайней мере, одним слоем молекул. Такой монослой содержит примерно $5 \cdot 10^{18}$ молекул на площади 1 м^2 . Поскольку фактическая площадь, например полированной металлической поверхности из-за микрошероховатости в 5–10 раз, а грубо обработанной – более чем в 20 раз, больше геометрической, то на 1 м^2 поверхности стенок ка-

меры адсорбируется около 10^{20} молекул или $0,4 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}$ газа. В основном это молекулы воды, а также компоненты воздуха и углеводороды. При снижении давления в камере происходит нарушение динамического равновесия и молекул десорбируется больше, чем адсорбируется за то же время. Для металлов, не подвергнутых термообработке, начальная интенсивность десорбции при комнатной температуре составляет порядка $q_0 = 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и снижается со временем в течение первых 10 ч согласно следующей зависимости:

$$q_\tau = \frac{q_0}{\tau^n}, \quad (7.7)$$

где τ – время, ч (от 1 до 10 ч); $n = 0,7 \div 2,0$ (часто $n = 1,0$).

Продолжительность десорбции основного количества газов с поверхности можно сократить до нескольких минут, её прогрев – до 600 К.

Газовыделение конструкционных материалов

После удаления газа с поверхности стенок определяющим может стать выделение газов, растворенных в материале. При этом интенсивность газовыделения после выдержки под вакуумом не менее 10 ч равна

$$q_\tau = C_0 \sqrt{\frac{D}{\pi \tau}}, \quad (7.8)$$

где C_0 – начальная концентрация газа в материале, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{м}^3$; D – коэффициент диффузии газа в материале, $\text{м}^2 / \text{с}$; $\tau > 3,6 \cdot 10^4 \text{ с}$ – продолжительность газовыделения, с.

Практически в металлах могут растворяться атомы только трех газов: H_2 , O_2 и N_2 . Наибольший вклад в газовыделение при комнатной температуре вносит водород, вследствие большой диффузионной подвижности.

В табл. 7.1 приведены значения C_0 и D для нержавеющей стали и алюминия, как наиболее распространенных конструкционных материалов [4].

Таблица 7.1

Скорость выделения водорода, коэффициент диффузии и концентрация растворенного водорода при 20 °С

Материал, способ обработки поверхности	q_{H_2} при $\tau = 20 \text{ ч}$, $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$	D , $\text{м}^2 / \text{с}$	C_0 , $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{м}^3$
Сталь 12Х18Н10Т, травление	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-13}$	$1,3 \cdot 10^3$

Алюминий А95, травление	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5,1 \cdot 10^3$
-------------------------	---------------------	--------------------	------------------

Согласно уравнению (7.4), снизить газовыделение можно путем уменьшения начальной концентрации газа C_0 или коэффициента диффузии D . Для уменьшения C_0 стенки камеры нагревают до температуры 400–450 °С и выдерживают под вакуумом 15–20 ч. При повышенной температуре диффузионный перенос газов ускоряется и материал интенсивно обезгаживается.

Второй путь снижения газовыделения заключается в уменьшении коэффициента диффузии путем охлаждения стенок объекта до криогенных температур, либо путем образования на поверхности материала защитных окисных пленок, замедляющих диффузию водорода из кристаллической решетки металла. Наименьшее газоотделение нержавеющей стали, которое удалось достигнуть при комнатной температуре, составляет порядка $10^{-10} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Проницаемость стенок объекта

Для стационарного процесса количество $Q_{\text{п}}$ газа, проникающего через стенку толщиной d и площадью F ,

$$Q_{\text{п}} = \frac{kF(p^n - p_0^n)}{d}, \quad (7.9)$$

где k – коэффициент проницаемости; p – давление газа со стороны атмосферы; p_0 – давление газа в объекте; n – показатель, равный единице для неметаллов и 0,5 – для металлов.

Значения коэффициента проницаемости для ряда конструкционных материалов при комнатной температуре приведены в табл. 7.2

Таблица 7.2

Коэффициент проницаемости при комнатной температуре

Материал	Газ	$k, \text{м}^2/\text{с}$	Материал (металл)	Газ	$k, \text{м}^2 \cdot \text{Па}^{0,5} \cdot \text{с}^{-1}$
Полиэтилен	H ₂	$(6-12)10^{-12}$	Малоуглеродистая сталь	H ₂	10^{-12}
	N ₂	$(6-11)10^{-13}$			
	He	$2 \cdot 10^{-13}$			
Кварц	He	$2 \cdot 10^{-11}$	Нержавеющая сталь	H ₂	$\sim 10^{-14}$
Неопрен	N ₂	$3 \cdot 10^{-12}$	Медь	H ₂	$\sim 2 \cdot 10^{-16}$

Водород, характеризующийся самой высокой скоростью диффузии, является основным газом, который проникает через металлы. Проникновением других газов в большинстве случаев можно пренебречь. Стекло наиболее проницаемо для гелия.

8. ИСПЫТАНИЕ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

Испытание на герметичность изделий, предназначенных для работы в условиях вакуума, является одним из основных методов контроля их качества. Метод испытания на герметичность необходимо выбирать таким образом, чтобы нижний предел измерения потока был меньше допустимого значения, заданного в технических условиях на испытываемое изделие (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Нижние пределы измерения потока различными методами

Наименование метода	Минимальный эквивалентный поток, $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$
Манометрический	$1 \cdot 10^{-7}$
Масс-спектрометрический при вакуумировании	$1 \cdot 10^{-11}$
Масс-спектрометрический способ обдува гелием	$1 \cdot 10^{-9}$
Масс-спектрометрический способ щупа (пробный газ – гелий)	$1 \cdot 10^{-8}$
Галоидный при вакуумировании испытываемого изделия	$1 \cdot 10^{-8}$
Галоидный способ обдува	$1 \cdot 10^{-7}$
Галоидный способ щупа	$1 \cdot 10^{-5}$
Пузырьковый пленочный	$1 \cdot 10^{-4}$

К основным методам контроля герметичности относятся: пузырьковый, масс-спектрометрический, контроль с помощью щупа.

Пузырьковый метод

В случае заполнения испытываемого объекта воздухом или азотом под избыточным давлением на его наружную поверхность наносят мыльную эмульсию. При наличии течей индикаторный газ, про-

никая через них, образует мыльные пузыри, позволяющие качественно оценить герметичность. Следует иметь в виду, что время наблюдения не должно превышать 5 мин, поскольку мыльная пленка, высыхая, теряет свои эластичные свойства. Таким способом регистрируются течи до $4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Течь может быть обнаружена и пузырьковым методом с погружением испытуемого объекта в воду. Индикацию утечек производят по частоте появления пузырьков газа, возникающих в местах течей, при этом достаточная глубина погружения – не более 3–5 мм. Чувствительность этого способа контроля герметичности при прочих равных условиях зависит от времени выдержки, а также от применяемого газа. Например, при использовании вместо воздуха водорода она может быть повышена в два раза.

Масс-спектрометрический метод

Масс-спектрометрический метод контроля герметичности является наиболее совершенным и широко применяемым в самых разных отраслях промышленности. Это обусловлено его высокой чувствительностью и избирательностью к пробному газу, универсальностью.

Метод основан на разделении по массе сложной смеси газов и паров в электрическом и магнитном полях. В принципе любой масс-спектрометр пригоден для поиска течей. Тем не менее, развитие техники обусловило необходимость создания специализированных масс-спектрометрических течеискателей, не применяемых для газового анализа, но обладающих рядом существенных преимуществ по сравнению с газоаналитическими масс-спектрометрами. Эти преимущества состоят в следующем. Масс-спектрометрический течеискатель имеет собственную откачную систему, что обеспечивает возможность проверки любых вакуумных систем и объемов, откачанных до высокого вакуума или находящихся под избыточным давлением.

Обычно масс-спектрометрический течеискатель настроен на регистрацию одного пробного газа – гелия. Это связано с тем, что гелия в атмосфере мало ($5 \cdot 10^{-4} \%$) и он отсутствует в продуктах газовой выделения вакуумных систем. Поэтому фоновые эффекты при работе с ним сказываются значительно меньше, чем в случае применения других веществ. Малая молекулярная масса гелия и относительно большое ее отличие от эффективной массы ионов, образующих со-

седние пики в масс-спектре (водород H_2 и углерод C^{++}), позволяют снизить требования к разрешающей способности анализатора и применять достаточно простой магнитный анализатор с высокой чувствительностью ($7,5 \cdot 10^{-6}$ А/Па), что соответствует возможности регистрации парциального давления гелия $p_{\min} = 1 \cdot 10^{-10}$ Па. Кроме того, гелий обладает почти в три раза большей проникающей способностью, чем воздух; следовательно, требуется менее чувствительный прибор для определения течи одинаковых размеров.

Контроль герметичности изделия с помощью щупа

Сущность данного способа заключается в перемещении щупа-натекателя, соединенного шлангом с течеискателем типа ПТИ, по соединениям испытуемой системы, находящейся под давлением индикаторного газа.

Индикаторный газ при наличии негерметичности засасывается щупом-накателем в течеискатель, выносной прибор которого отклонением стрелки и изменением тональности звукового сигнала фиксирует утечку контрольного газа. Схема установки для контроля герметичности с помощью щупа представлена на рис. 8.1. Соединительный трубопровод должен быть герметичным и обладать предельно малым газовыделением и «памятью» по гелию. Длина трубопроводов определяется необходимостью приближения щупа-натекателя к наиболее удаленным участкам.

Контроль герметичности вакуумированием испытуемого объекта с последующим обдуванием его контрольным газом

Способ «обдувания» является основным при контроле герметичности вновь изготавливаемых вакуумных установок и служит для поиска локальных течей. Он является индикаторным способом, поэтому применять его для количественной оценки величин течи не рекомендуется. Сущность способа «обдувания» заключается в следующем: в испытуемом объекте создается разрежение, а его наружная поверхность обдувается тонкой струей гелия. При наличии течи гелий проникает в полость изделия, соединенную с масс-спектрометрической камерой течеискателя, что приводит к отклонению стрелки выносного прибора течеискателя. Схема установки для контроля герметичности этим методом изображена на рис. 8.2.

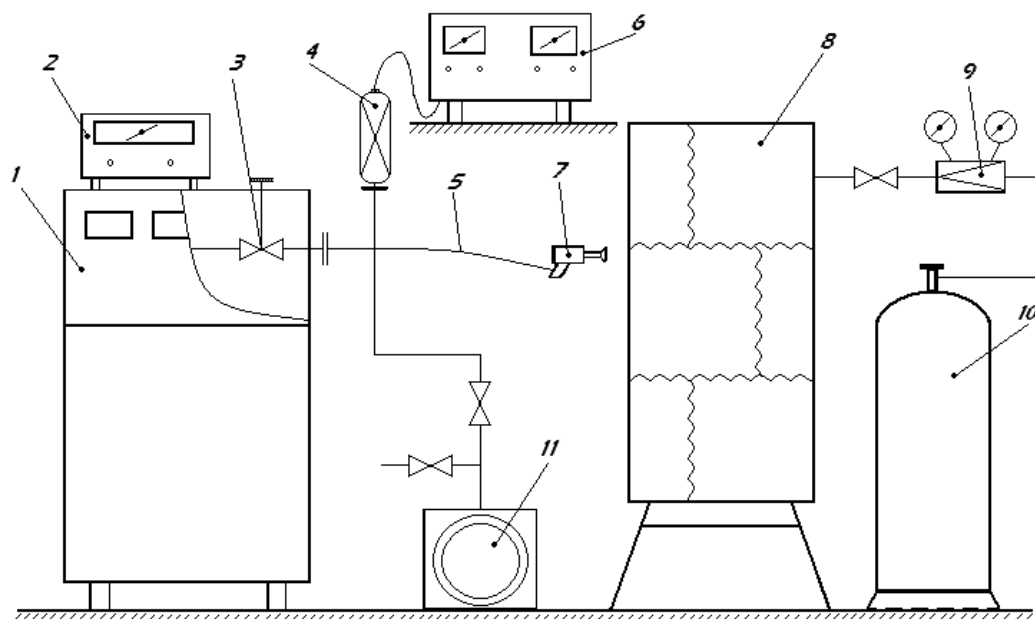


Рис. 8.1. Схема установки для контроля герметичности с помощью шупа:
 1 – гелиевый течеискатель ПТИ; 2 – выносной пульт управления течеискателя (ВПУ);
 3 – вентиль дросселирующий Ду-32 течеискателя; 4 – преобразователь манометрический термопарный; 5 – гибкий трубопровод; 6 – вакуумметр; 7 – шуп-
 натекатель; 8 – испытуемый объект; 9 – редуктор газовый; 10 – баллон
 с контрольным газом; 11 – механический вакуумный насос

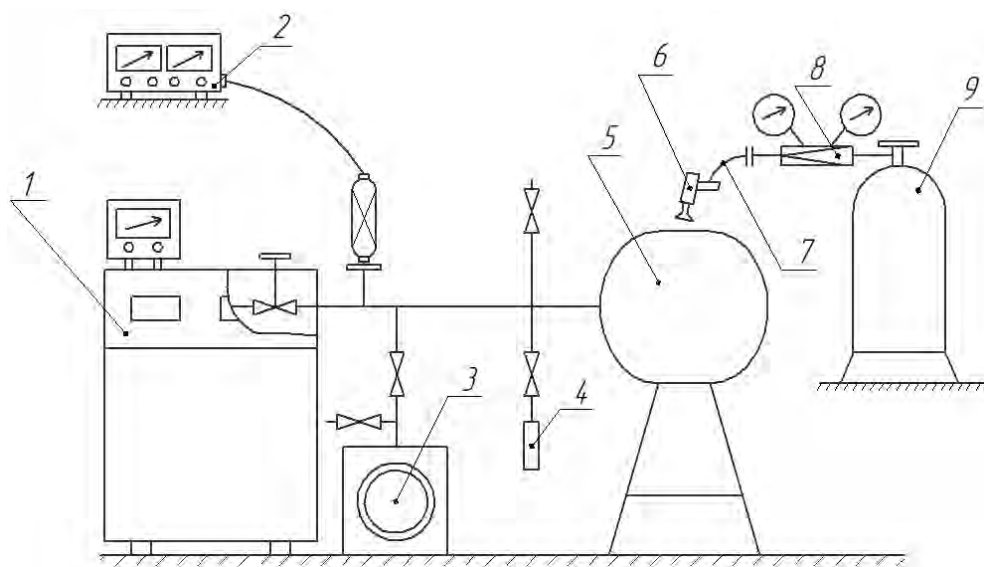


Рис. 8.2. Схема установки для контроля герметичности вакуумированием
 испытуемого объекта с последующим обдуванием его индикаторным газом:
 1 – течеискатель типа ПТИ; 2 – вакуумметр с манометрическим преобразователем;
 3 – механический вакуумный насос; 4 – контрольная течь; 5 – испытуемый объект;
 6 – обдуватель; 7 – гибкий шланг; 8 – редуктор газовый;
 9 – баллон с индикаторным газом

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основной

1. Вакуумная техника: Справ./Под ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. – М.: Машиностроение, 2009. – 590 с.
2. Вакуумная техника: Справ./Под ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
3. ГОСТ Р 53177–2008. Вакуумная техника. Определение характеристик масс-спектрометрического метода контроля герметичности.
4. **Иванов В.И.** Введение в вакуумную технику: Учеб. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012. – 42 с.
5. **Иванов В.И.** Безмасляные вакуумные насосы. – Л.: Машиностроение, 1980. – 160 с.
6. Патент RU 2070993. Вихревой вакуумный насос.
7. **Куприянов В.И., Исаев А.В., Кряковкин В.П.** Адсорбционные насосы с пористыми экранами. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1990. – 34 с.
8. **Иванов В.И.** Криовакуумные системы: Учеб. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012. – 48 с.

Дополнительный

- Справочник по вакуумной технике и технологиям / Под ред. Д. Хоффман, Б. Сингха, Дж. Тамаса III. – М.: Техносферы, 2011. – 736 с.
- ГОСТ 5197–85. Вакуумная техника. Термины и определения.
- Хэфер Р.** Криовакуумная техника: – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
- Саксаганский Г.Л.** Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.
- Вентура Г., Ризегари Л.** Искусство криогеники. – М.: Изд. Дом «Интеллект», 2011. – 336 с.
- Контроль герметичности изделий космической отрасли/С.В. Кравченко, С.Б. Нестеров, В.А. Романько и др.; Под ред. С.Б. Нестерова. – М.: НОВЕЛЛА, 2012. – 157 с.
- Низкотемпературные системы откачки: Учеб. пособие/С.Б. Нестеров и др. – М.: Изд-во «Дом МЭИ», 2007. – 80 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ВАКУУМ. НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ	5
1.1. Уравнение состояния идеального газа	5
1.2. Средняя арифметическая скорость молекул	6
1.3. Частота соударений молекул газа с поверхностью	7
1.4. Средняя длина свободного пробега молекул	7
1.5. Коэффициенты переноса в газах	8
1.6. Число Кнудсена	9
2. ЭЛЕМЕНТЫ РАСЧЕТА ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ, РАБОТАЮЩЕЙ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ	11
2.1. Основное уравнение вакуумной техники	11
2.2. Проводимость элементов вакуумных систем	13
2.2.1. Проводимость отверстия при вязкостном режиме течения газа	13
2.2.2. Проводимость отверстия при молекулярном режиме течения газа	15
2.2.3. Идеальный вакуумный насос	16
2.2.4. Проводимость трубопровода при вязкостном режиме течения газа	17
2.2.5. Проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения газа	17
2.3. Условие равновесия в неизотермических объектах	19
3. ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА	22
3.1. Вакуумметры	22
3.1.1. Жидкостные вакуумметры	23
3.1.2. Компрессионный вакуумметр	26
3.1.3. Деформационные вакуумметры	27
3.1.4. Тепловые вакуумметры	29
3.1.5. Ионизационные вакуумметры	35
3.1.6. Специфика измерения вакуума в криогенных объектах	39
3.2. Масс-спектрометры	42
3.2.1. Классификация масс-спектрометров	42
3.2.2. Статический масс-спектрометр	44
3.2.3. Времяпролётный масс-спектрометр	45

4. ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ	47
4.1. Механические вакуумные насосы	48
4.1.1. Ротационные вакуумные насосы с масляным уплотнением.....	48
4.1.2. Жидкостно-кольцевые вакуумные насосы	55
4.1.3. Двухроторные вакуумные насосы	57
4.1.4. Вихревые вакуумные насосы	60
4.1.5. Мембранные вакуумные насосы.....	61
4.1.6. Турбомолекулярные вакуумные насосы	62
4.2. Струйные вакуумные насосы	67
4.2.1. Водоструйные вакуумные насосы	68
4.2.2. Газоструйные вакуумные насосы	69
4.2.3. Пароструйные вакуумные насосы	69
4.2.4. Криогенные струйные насосы.....	76
4.3. Сорбционные вакуумные насосы	79
4.3.1. Испарительные геттерные вакуумные насосы	81
4.3.2. Магниторазрядные вакуумные насосы	84
4.3.3. Криoadсорбционные вакуумные насосы.....	86
4.3.4. Криоконденсационные вакуумные насосы.....	95
5. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ.....	109
6. ЭЛЕМЕНТЫ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ	112
7. НЕКОТОРЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ.....	117
8. ИСПЫТАНИЕ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	126

Иванов Владислав Иванович

ВАКУУМНАЯ ТЕХНИКА

Учебное пособие

Ответственный редактор

Т.Г. Смирнова

Редактор

Е.О. Трусова

Компьютерная верстка

Д.Е. Мышковский

Дизайн обложки

Н.А. Потехина

Подписано в печать 15.04.2016. Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л. 7,68. Печ. л. 8,25. Уч.-изд. л. 8,0

Тираж 200 экз. Заказ № С 2

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9