

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЧЕЧЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Алчагиров Б.Б., Гонов С.Ж., Дадашев Р.Х.,
Калажоков Х.Х., Дышекова Ф.Ф.**

ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА

Рекомендовано редакционно-издательским советом КБГУ и ЧГУ в
качестве учебного пособия для студентов, обучающихся
по направлению 011200.62 Физика, 011200.68 Физика, 210601.65
Нанотехнология в электронике, 210100.62 Электроника и
наноэлектроника

**Нальчик – Грозный
2016**

**Печатается по решению Учёного Совета
ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет»
Протокол № 7 от 06.11.2014 г.**

**УДК 621.52.
ББК Ж60я73-5
А 55**

Рецензент: М.П. Дохов,
доктор технических наук, профессор кафедры физики
Кабардино-Балкарского государственного аграрного
университета им. В.М. Кокова

**Алчагиров Б.Б., Гонов С.Ж., Дадашев Р.Х., Калажиков Х.Х.,
Дышекова Ф.Ф.** Получение и измерение вакуума [Текст]: Учебное
пособие / Б.Б. Алчагиров, С.Ж. Гонов, Р.Х. Дадашев, Х.Х. Калажи-
ков, Ф.Ф. Дышекова. – Грозный: издательство ФГБОУ ВО «Чечен-
ский государственный университет», 2016. – 100 экз.

В учебном пособии дается краткое изложение теоретических основ и физико-химических явлений и процессов, на которых основано действие и работа различных типов вакуумных насосов и манометрических датчиков. Приводятся описания лабораторных работ по получению и измерению вакуума во всем диапазоне разрежений - от низкого и до сверхвысокого вакуума. В приложениях даются технические описания различных типов отечественной вакуумной техники и инструкции по их эксплуатации, которыми оснащены лаборатории физических факультетов КБГУ и ЧГУ.

Учебное пособие предназначено для студентов-старшекурсников физических специальностей и начинающих исследователей, оно может служить практическим руководством для ознакомления с основными методами и техникой получения и измерения вакуума.

©ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет», 2016

ВВЕДЕНИЕ

Вакуумная техника получила в настоящее время самое широкое распространение в различных отраслях науки и техники. С развитием техники получения высокого и сверхвысокого вакуума неразрывно связаны многие достижения физики межфазных явлений, физики высоких энергий, радиоэлектроники, электровакуумного производства, технологии получения сверхчистых материалов и т.д.

Значительная доля современных исследовательских лабораторий оснащена разнообразными вакуумными установками. В частности, для проведения многих исследований по физике межфазных явлений вакуумирование объектов исследований становится совершенно необходимым условием при измерениях поверхностного натяжения, работы выхода электронов жидкометаллических расплавов фотоэлектрическим методом, при изучении составов и структуры поверхности конденсированных фаз методами Оже-электронной спектроскопии и дифракции электронов низких энергий и т.д. В связи с этим во многих научно-исследовательских и учебных лабораториях физических факультетов КБГУ и ЧГУ успешно эксплуатируются практически все основные типы вакуумных насосов: цеолитовые и механические – для создания предварительного разрежения, пароструйные (диффузионные) насосы – для получения высокого вакуума, а также серия современных безмасляных сверхвысоковакуумных насосов типа геттерно-ионных (ГИН), криогенных, магнитоэлектроразрядных (ТРИОН, НОРД, НМД, СОН и др.), в том числе сверхвысоковакуумные турбомолекулярные насосы, откачивающие практически все газы, включая и инертные и т.д.

Настоящее издание должно помочь студентам старших курсов физических специальностей, магистрантам, аспирантам и начинающим исследователям в получении необходимых теоретических представлений и практических навыков по эксплуатации современной вакуумной техники и особенностей измерения вакуума во всем диапазоне разрежений – от атмосферного и до сверхвысокого вакуума.

УКАЗАНИЯ МЕР ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Для обеспечения безопасной работы в учебных лабораториях по получению и измерению вакуума категорически запрещается:

- а) Допускать к работе с вакуумной техникой и насосами студентов, не прошедших инструктаж по технике безопасности на рабочем месте;
- б) Включение вакуумных насосов с открытой клеммной колодкой электродвигателя;
- в) При эксплуатации вакуумных насосов выхлопные газы должны быть отведены из лаборатории, где установлен насос;
- г) Подсоединение электропитания к насосу должно быть выполнено в соответствии с «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ);
- д) **Помните, что сверхвысоковакуумные насосы типов ГИН, ТРИОН, НОРД и НМД работают при напряжении до 7000 В, что очень опасно для жизни!** Поэтому требуется строгое соблюдение правил техники безопасности при работе на электроустановках с напряжением свыше 1000 В!
- е) Во время работы **корпус насоса может разогреться до температуры + 250 °С и выше, - остерегайтесь ожогов!**
- ж) Перед началом работы убедитесь, что токоведущие части насоса и блоков питания защищены кожухами, а ручки управления на панелях блоков выведены в положение «выключено»;
- з) Внешним осмотром вакуумных установок убедитесь в наличии и исправности заземления корпуса насоса и блоков питания.

1. Теоретическое введение

1.1. Некоторые понятия и определения

I. Состояние газа, имеющего плотность меньшую, чем его плотность при нормальных физических условиях, называется вакуумом (от латинского «vacuum» – пустота). Единицей измерения вакуума в системе СИ является Паскаль (Па). Количественные соотношения между 1 Па и рядом других внесистемных единиц даются в табл. 1.

Таблица 1. Соотношения между единицами измерения давления

Понятие «Вакуум» применяется к газу в замкнутом или откачиваемом сосуде, но нередко распространяется и на газ в свободном пространстве, например к космосу.

По степени разреженности газов условно различают низкий,

Единицы давления	Па, Н/м ²	мм. рт. ст. (Тор)	дин/см ² = мкбар	бар	атм. = кгс/см ² = 10 ⁴ кгс/м ²	атм.
Па = Н/м ²	1	750·10 ⁻⁵	10	10 ⁻⁵	1,02·10 ⁻⁵	0,987·10 ⁻⁵
1 мм. рт. ст. (Тор)	1,333 10 ²	1	1,333·10 ³	1,333·10 ⁻³	1,360·10 ⁻³	1,316·10 ⁻³
дин/см ² = мкбар	10 ⁻¹	750·10 ⁻⁶	1	10 ⁻⁶	1,02·10 ⁻⁶	0,987·10 ⁻⁶
бар	10 ⁵	750	10 ⁶	1	1,02	0,987
атм. = кгс/см ² = 10 ⁴ кгс/м ²	0,981·10 ⁵	736	0,981·10 ⁶	0,981	1	0,968
атм.	1,013·10 ⁵	760	1,013·10 ⁶	1,013	1,033	1

средний, высокий и сверхвысокий вакуум. При этом исходят из того, что от отношения средней длины свободного пробега частиц ($\bar{\lambda}$) к характерному линейному поперечному размеру откачиваемого объема (d) сильно различаются многие физические процессы, происходящие в газовой среде:

- а) $\bar{\lambda}/d \ll 1$, – низкий вакуум (до 10 Па);
- б) $\bar{\lambda}/d \approx 1$, – средний вакуум (10 – 10⁻² Па);
- в) $\bar{\lambda}/d > 1$, – высокий (10⁻² – 10⁻⁵ Па);
- г) $\bar{\lambda}/d \gg 1$, – сверхвысокий вакуум (от 10⁻⁶ Па и выше).

Некоторое представление о связи средней длины свободного пробега частиц $\bar{\lambda}$ с числом частиц в единице объема, степенью вакуума в нем и др. параметрами дает табл. 2.

Степень вакуума определяют, измеряя величину давления остаточных газов. В обычных вакуумных установках с линейным поперечным размером d откачиваемого прибора величина d составляет порядка 10 см. В этом случае низкому вакууму соответствуют давления $P > 1$ мм. рт. ст., среднему вакууму - P от ~ 1 до 10⁻³ мм. рт. ст. и высокому вакууму $P < 10^{-3}$ мм. рт. ст.

В порах и каналах диаметром 1 мкм высокий вакуум соответствует P от десятков до сотен мм. рт. ст., а в камерах для имитации космического пространства размером в десятки метров граница

между средним и высоким вакуумом достигала бы $\sim 10^{-5}$ мм. рт. ст.

В сверхвысоком вакууме ($P < 10^{-6}$ Па) не происходит заметно-го изменения свойств поверхности первоначально свободной от адсорбированного газа, за время, существенное для данного процесса. Понятие сверхвысокого связано не столько с величиной отношения λ/d , а со временем τ , необходимым для образования мономолекулярного слоя газа на поверхности твердого тела в вакууме, которое обратно пропорционально давлению. В частности, при $P \approx 10^{-4}$ Па время $\tau \sim 1$ с. При других давлениях оно может оцениваться по формуле: $\tau = 10^{-6}/P$, которая справедлива, если каждая молекула газа, соударяющаяся с поверхностью, остается на ней (коэффициента захвата равен 1) В большинстве случаев, однако, коэффициент захвата меньше 1, и τ увеличивается.

1.2. Три основных режима течения газа

Различают три основных режима течения газа:

- а) – вязкостный – в области низкого вакуума,
- б) – молекулярно - вязкостный – в области среднего вакуума,
- в) – молекулярный – в области высокого вакуума.

Таблица 2. Связь средней длины свободного пробега частиц $\bar{\lambda}$ с числом частиц в единице объема, степенью вакуума в нем и др. параметрами

Давление воздуха, Па	Давление воздуха, мм рт. ст.	Длина свободного пробега молекул λ , см	Количество молекул N , находящихся в объеме 1 см ³	Количество молекул N_n , ударяющихся о стенку площадью 1 см ² за 1 сек	Количество соударений молекул N_0 в объеме 1 см ³ за 1 сек	Время, необходимое для образования мономолекулярного слоя, сек
101325	$7,6 \cdot 10^2$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{19}$	$2,9 \cdot 10^{23}$	$1,8 \cdot 10^{29}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$
13333	$1 \cdot 10^2$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{18}$	$3,8 \cdot 10^{22}$	$3,2 \cdot 10^{27}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$
1333	$1 \cdot 10$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{17}$	$3,8 \cdot 10^{21}$	$3,2 \cdot 10^{25}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$
133,3	1	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{16}$	$3,8 \cdot 10^{20}$	$3,2 \cdot 10^{23}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$
13,33	$1 \cdot 10^{-1}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{15}$	$3,8 \cdot 10^{19}$	$3,2 \cdot 10^{21}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
1,33	$1 \cdot 10^{-2}$	$4,7 \cdot 10^{-1}$	$3,3 \cdot 10^{14}$	$3,8 \cdot 10^{18}$	$3,2 \cdot 10^{19}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$
$1,33 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-3}$	4,7	$3,3 \cdot 10^{13}$	$3,8 \cdot 10^{17}$	$3,2 \cdot 10^{17}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
$1,33 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10$	$3,3 \cdot 10^{12}$	$3,8 \cdot 10^{16}$	$3,2 \cdot 10^{15}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^2$	$3,3 \cdot 10^{11}$	$3,8 \cdot 10^{15}$	$3,2 \cdot 10^{13}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$
$1,33 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^{10}$	$3,8 \cdot 10^{14}$	$3,2 \cdot 10^{11}$	1,9
$1,33 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^9$	$3,8 \cdot 10^{13}$	$3,2 \cdot 10^9$	$1,9 \cdot 10$
$1,33 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$4,7 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^8$	$3,8 \cdot 10^{12}$	$3,2 \cdot 10^7$	$1,9 \cdot 10^2$
$1,33 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$4,7 \cdot 10^6$	$3,3 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^{11}$	$3,2 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^3$

$1,33 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$4,7 \cdot 10^7$	$3,3 \cdot 10^6$	$3,8 \cdot 10^{10}$	$3,2 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^4$
$1,33 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$4,7 \cdot 10^8$	$3,3 \cdot 10^5$	$3,8 \cdot 10^9$	$3,2 \cdot 10$	$1,9 \cdot 10^5$
$1,33 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$4,7 \cdot 10^9$	$3,3 \cdot 10^4$	$3,8 \cdot 10^8$	0,32	$1,9 \cdot 10^6$
$1,33 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$4,7 \cdot 10^{10}$	$3,3 \cdot 10^3$	$3,8 \cdot 10^7$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^7$
$1,33 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$4,7 \cdot 10^{11}$	$3,3 \cdot 10^2$	$3,8 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^8$
$1,33 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-15}$	$4,7 \cdot 10^{12}$	$3,3 \cdot 10$	$3,8 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$1,9 \cdot 10^9$

1.2.1. Вязкостный режим течения газа имеет место в начальный период откачки и продолжается недолго. В этом режиме течения газа в связи с малой длиной свободного пробега частиц (молекул), последние сталкиваются друг с другом при своем движении по трубопроводу. В результате молекулы полностью теряют свою направленную скорость и газ движется с разной скоростью по поперечному сечению трубопровода. В частности, в цилиндрическом трубопроводе скорость движения газа будет функцией расстояния от оси трубки.

Пропускная способность вакуумного трубопровода U характеризуется количеством газа, протекающим через поперечное сечение трубопровода в единицу времени при единичной разности давлений на концах трубопровода:

$$U = \frac{Q}{P_2 - P_1}, \quad (1)$$

где Q – поток газа, выраженное в единицах $\frac{PV}{сек}$, $Н \cdot м / сек$, в котором $P_2 - P_1$ – разность давлений на концах трубопровода, $Н / м^2$.

В случае вязкого режима течения газа пропускная способность вакуумного трубопровода круглого сечения радиуса R будет равна:

$$U_{\text{вязк}} = \frac{\pi R^4}{8\eta l} \cdot \frac{P_2 + P_1}{2}, \quad (2)$$

где η коэффициент вязкости, l – длина трубопровода.

В частности, полагая для воздуха (20 °С) $\eta = 18,1 \cdot 10^{-6}$ Пуаз и заменяя $2R = d$, будем иметь:

$$U_{\text{вязк}} = 1,35 \cdot 10^3 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot P_{cp} \quad [м^3 / сек], \quad (2a)$$

т.е. в указанном режиме течения газа пропускная способность вакуумного трубопровода прямо пропорциональна диаметру в четвертой степени и обратно пропорциональна длине трубопровода.

1.2.2. Молекулярный режим течения газа

В случае молекулярного режима течения газа частицы газа практически движутся независимо друг от друга, по закону хаотического теплового движения. Молекулы газа почти не сталкиваются друг с другом и не обмениваются энергиями. При этом количество газа, протекающее через вакуумный трубопровод, будет определяться пропускной способностью последнего.

Для цилиндрического трубопровода длиной l и диаметра d Кнудсен получил следующую формулу для расчета пропускной способности в молекулярном режиме течения газа:

$$U_{\text{мол}} = \frac{\sqrt{2\pi}}{6} \cdot \frac{d^3}{l\sqrt{\rho}}, \text{ [м}^3\text{/сек]} \quad (3)$$

где $\rho = \frac{\mu}{R_0 T}$, T – абсолютная температура, R_0 – универсальная газовая постоянная.

В частности, полагая для воздуха (при 20 °С)

$$\sqrt{\rho} = 3,45 \cdot 10^{-3} \text{ сек/м},$$

будем иметь:

$$U_{\text{мол}} = \frac{d^3}{l} \text{ [м}^3\text{/сек]}, \quad (3a)$$

т.е. в молекулярном режиме течения газа пропускная способность прямо пропорциональна диаметру трубопровода в третьей степени и уже не зависит от давления газа в нем.

1.2.3. Молекулярно-вязкостной режим течения газа

Пропускная способность зависит от температуры и рода газа: она повышается с уменьшением молекулярного веса и повышением температуры газа. В промежуточной области давлений имеет место, как указывалось выше, молекулярно-вязкостной режим течения газа.

По Кнудсену, в этом режиме пропускная способность может быть рассчитана с погрешностью, не превышающей 10%, по полуэмпирической формуле:

$$U_{\text{м-в}} = U_{\text{в}} + b \cdot U_{\text{м}}, \quad (4)$$

где b – коэффициент, значение которого лежит в интервале $0,8 \leq b \leq 1$, в зависимости от конкретного значения давления.

Полагая в среднем $b = 0,9$ и используя (2а) и (3а), Кнудсен получил расчетную формулу для пропускной способности вакуумного трубопровода $U_{м-в}$ в виде:

$$U_{м-в} = 1,35 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \cdot P_{ср} + 110 \frac{d^3}{l} [м^3/сек]. \quad (5)$$

2. Основные методы и техника измерения вакуума

Диапазон давлений разреженного газа, в которых в настоящее время практически приходится проводить измерения, очень широк и простирается от 10^3 до 10^{-13} Па. Вместе с тем нет еще такого одного типа манометра, который бы позволил измерять вакуум во всем указанном диапазоне. Этим объясняется наличие множества различных манометров, каждый из которых предназначен для измерения вакуума в той или иной области разрежения. В целом все они обеспечивают достаточно хорошее перекрытие вышеуказанного диапазона давлений (см. рис. 1).

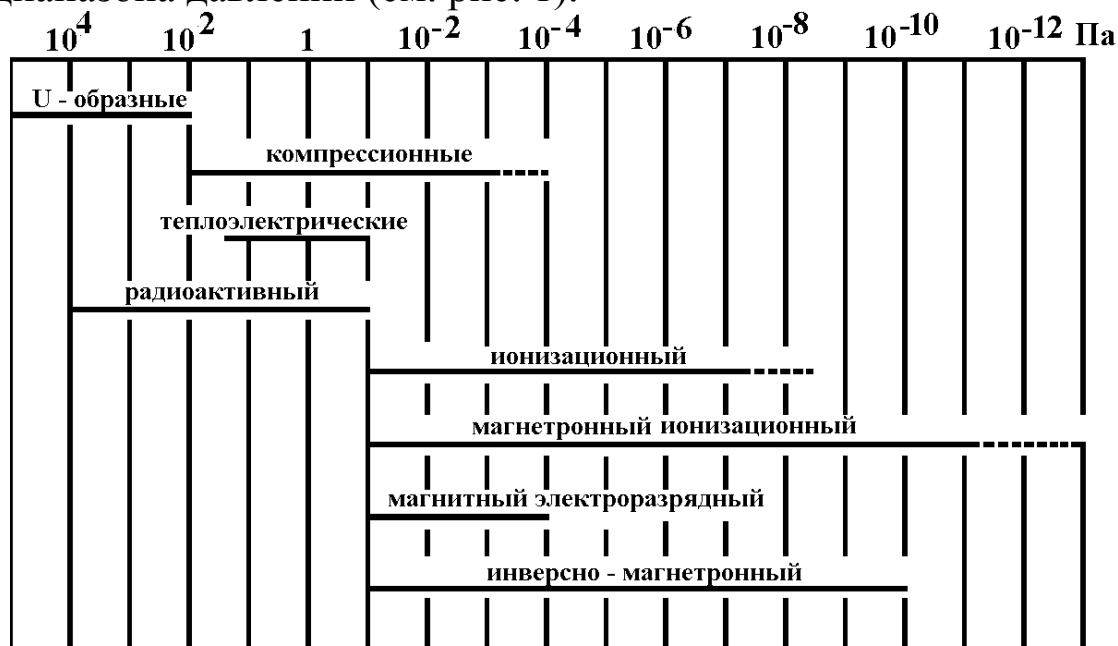


Рис. 1. Диапазоны работы вакуумметров различных типов (в Па)

По принципу действия и диапазону измеряемых давлений манометры подразделяются на а) - жидкостные, б) - теплоэлектрические, в) - электроразрядные.

2.1. Жидкостные манометры

К жидкостным манометрам относятся U-образные и так называемые компрессионные, (типа Мак-Леода). Жидкостными

манометрами называются статические манометры, действие которых основано на непосредственном измерении статического давления газа по разности уровней жидкости в сообщающихся сосудах.

Примером жидкостного манометра может служить ртутный барометр, устройство и действие которого должны быть известны из элементарного курса физики.

2.2. U-образные

открытые и закрытые манометры

В зависимости от диапазона измеряемых давлений используются открытые и закрытые U-образные манометры. Открытый U-образный манометр показан на рис. 2. Это изогнутая в виде буквы U и заполненная ртутью стеклянная трубка, один конец которой присоединяется к вакуумной системе, где измеряется давление, а другой сообщается с атмосферой.

Измеряемое давление p_c определяется по разности уровней ртути h (мм) в U-образной трубке и величине атмосферного давления p_a , Па:

$$p_c = (p_a - 1333,3 \cdot 103 \cdot h) = (p_a - 133,3 \cdot h \text{ мм}), [\text{Па}] \quad (6)$$

где h - разность уровней ртути, измеренная в мм.

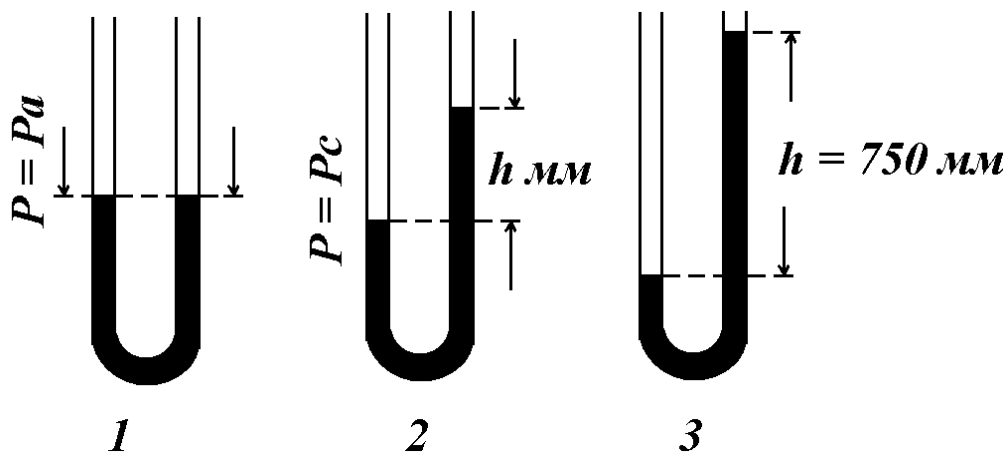


Рис. 2. Открытый U-образный манометр. Положение уровней ртути: 1 – до откачки; 2 – после частичной откачки; 3 – после полной откачки

Величина атмосферного давления в течение года, а иногда и даже одних суток, может значительно изменяться. Поэтому для точных измерений необходимо знать атмосферное давление в момент, когда производится измерение. В противном случае возможна большая погрешность, причем она будет тем больше, чем

меньше величина измеряемого давления. Поэтому при измерении давления ниже $\sim 1 \cdot 10^4$ Па (~ 90 мм. рт. ст.) уже встречаются большие затруднения. В этих случаях целесообразно пользоваться закрытыми U-образными манометрами, показания которых не зависят от величины атмосферного давления.

Закрытый U-образный манометр

Он отличается от открытого тем, что один из концов трубки вместо того, чтобы сообщаться с атмосферой, запаивается наглухо (рис. 3). Перед наполнением трубки ртутью из нее тщательно откачивается воздух, а ртуть предварительно обезгаживается.

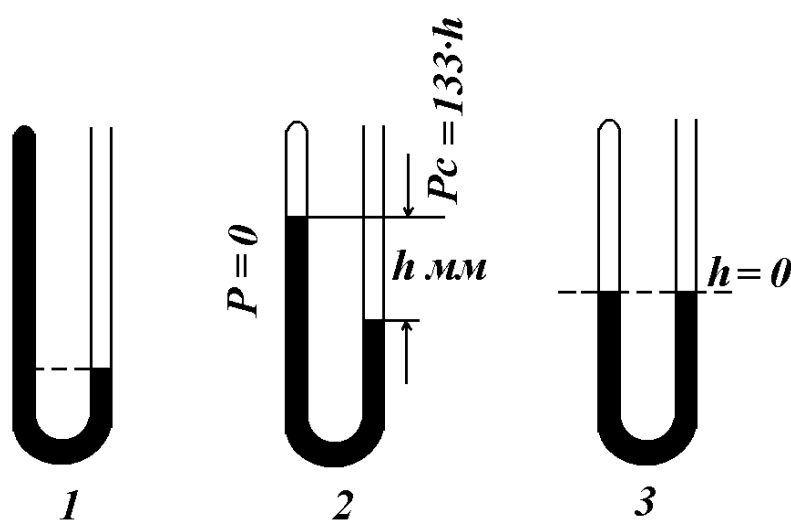


Рис. 3. Закрытый U-образный манометр. Положение уровней ртути: 1 – до откачки газа из вакуумной системы; 2 – после частичной откачки; 3 – после полной откачки

Если такой манометр напаять на вакуумную систему, то давление газа p_c в нем может быть измерено по разности уровней ртути в U-образной трубке, т.е.

$$p_c = 133,3 \cdot 10^3 h = 133,3 \cdot h, \text{ [Па]} \quad (7)$$

если h измерено в мм.

Заметим, что если после откачки газа из вакуумной системы уровень ртути в запаянном конце трубки устанавливается ниже, чем в открытом, это указывает на недоброкачественность изготовления манометра (наличие газов в запаянном конце трубки).

Закрытые U-образные манометры обычно используются для измерения давлений газа не более $1,2 \cdot 10^4$ Па (90 мм. рт. ст.). При изготовлении манометров для измерения больших давлений нужно учитывать возможность повреждения манометра от резкого удара

ртути по концу запаянной трубки при впуске атмосферного воздуха в вакуумную систему. Поэтому рекомендуется на участке изгиба трубки делать сужение в виде узкого капилляра или диафрагмы с малым отверстием, что создаст некоторое сопротивление и затруднит быстрое передвижение ртути. С помощью закрытых U-образных манометров можно производить измерение давлений не ниже нескольких сот Па, так как погрешность при измерении давлений около 400 Па (< 3 Тор) получается уже достаточно большой.

2.3. Компрессионный манометр Мак-Леода

Действие этого манометра основано на непосредственном измерении давления по разности уровней рабочей жидкости в сообщающихся сосудах. Компрессионный манометр Мак-Леода - жидкостной манометр, охватывающий сравнительно широкий диапазон давлений от 400 до $1 \cdot 10^{-4}$ Па (или от 3 до 10^{-6} Тор).

Давление газа, измеряемое компрессионным манометром, определяется, как и в U-образных манометрах, по разности уровней жидкости в сообщающихся сосудах с той только разницей, что в одном из сосудов газ подвергается предварительному сжатию в некоторое число n раз. В связи с этим, согласно закону Бойля-Мариотта, давление сжатого газа, определяемое по разности уровней жидкости, также в n раз больше давления в вакуумной системе. Предварительное сжатие газа в компрессионном манометре позволяет производить измерение очень низких давлений.

Схематически компрессионный манометр показан на рис. 4а. Он изготавливается обычно из стекла и состоит из трубки 1, по которой вводится ртуть в манометр шарика 2 с капилляром 3, где происходит сжатие газа, трубки 4, с помощью которой манометр присоединяется в вакуумной системе, и капилляра 5 для сравнения уровней ртути в капиллярах 3 и 5. Заметим, что капилляры 3 и 5 должны иметь одинаковое сечение, чтобы действие капиллярных сил не было различным.

Измерение давления газа производится следующим образом. Ртуть по трубке 1 постепенно вводят в компрессионный манометр так, чтобы уровень ртути в капилляре 5 совпадал с верхней границей канала запаянного капилляра 3 (рис. 4б). Газ, находившийся в шарике 2 и капилляре 3 при давлении p_c , равном давлению в вакуумной системе, при подъеме ртути подвергается

сжатию, в результате его давление увеличивается. Давление сжатого газа может быть определено по разности уровней ртути h в капиллярах 3 и 5.

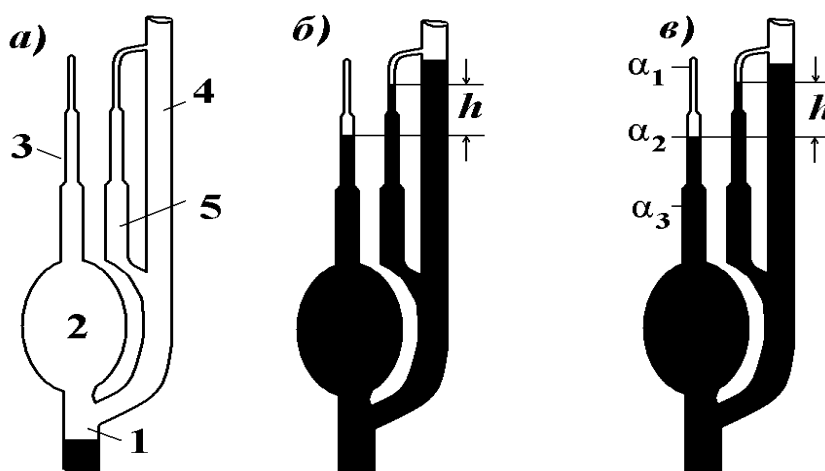


Рис. 4. Устройство компрессионного манометра: а – устройство; б – измерение давления по методу квадратичной шкалы; в – измерение по методу линейной шкалы

Пусть величина его будет p_v . Тогда, если известны геометрические размеры шарика и капилляра, то давление в вакуумной системе p_c может быть получено, согласно закону Бойля - Мариотта, из уравнения

$$V_0 p_c = V_1 p_1, \quad (8)$$

где V_0 - первоначальный объем сжимаемого газа, определяемый по емкости шарика 2 и капилляра 3; V_1 - конечный объем, определяемый по сечению S капилляра 3 и высоте h столба ртути.

Решая уравнение (8) относительно p_c и производя замену $p_1 = 133 \cdot 10^3 \cdot h$ и $V_1 = S \cdot h$, получим

$$\begin{aligned} p_c &= V_1 p_1 / V_0 = 133 \cdot 10^3 h (S \cdot h / V_0) = 133 \cdot 10^3 h^2 S / V_0 = \\ &= 133 \cdot 10^{-3} h^2 S / V_0, \text{ (мм)} = c \cdot h^2, \text{ [Па]}, \end{aligned} \quad (9)$$

в котором $c = 133 \cdot 10^{-3} S / V_0$ – постоянная манометра, зависящая от его геометрических размеров (при измерении h в мм.).

Так как измеряемое давление p_c прямо пропорционально квадрату высоты столба ртути h , то шкала манометра получается квадратичной. Поэтому описанный метод измерения давления был назван методом квадратичной шкалы.

Но на практике более часто применяется другой метод измерения – метод линейной шкалы. Он состоит в том, что уровень ртути устанавливается на определенной отметке не в правом (открытом) капилляре, а в левом (закрытом), рис. 4в. Для этого уровня

вычисляется отношение V_1/V_0 , которое в этом методе измерения является величиной постоянной. Поэтому уравнение (9) принимает вид:

$$p_c = V_1 p_1 / V_0 = 133 \cdot 10^3 h V_1 / V_0 = 133 h, \text{ мм} = \alpha \cdot h, \text{ мм} [\text{Па}], \quad (10)$$

т.е. давление газа пропорционально некоторому постоянному коэффициенту $\alpha \sim V_1/V_0$ и разности уровней ртути в капиллярах. Так как при этом шкала получается линейной, то сам метод измерения называют методом линейной шкалы. Обычно при линейном методе измерения на шкале наносится не одна, а несколько отметок (рис. 4в), причем для каждой отметки рассчитывается свой постоянный коэффициент α_i .

Станем повышать уровень ртути до той или иной отметки в зависимости от величины измеряемого давления (для этого используется приспособление, показанное на рис. 5). Если на данной отметке разность уровней ртути h в капиллярах получается недостаточной и при ее измерении может быть допущена большая погрешность, то повышение уровня ртути продолжается до следующей отметки, расположенной на более высоком уровне. При этом величина измеряемого давления, которая, очевидно, не должна зависеть от того, на каком уровне производится измерение, будет определяться из выражения

$$p_c = \alpha_1 h_1 = \alpha_2 h_2 = \dots = \alpha_n h_n. \quad (11)$$

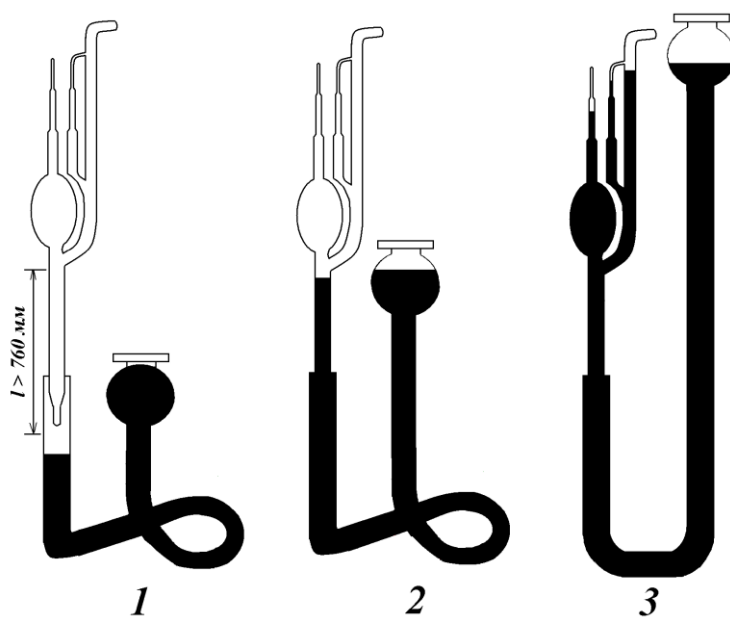


Рис. 5. Приспособление для введения и подъема ртути в компрессионный манометр: 1 – положение до откачки; 2 – после откачки; 3 – в процессе изме-

Манометры компрессионного типа являются абсолютными, в чем состоит их несомненное преимущество перед манометрами других типов. Диапазон давлений, измеряемых этими манометрами, составляет $10 \div 10^{-4}$ Па. Вместе с тем жидкостные манометры не позволяют измерять вакуум непрерывно, они имеют большие габариты, а в качестве рабочей жидкости содержат токсичную ртуть. Последнее обстоятельство ограничивает область применения жидкостных манометров.

2.4. Термоэлектрические манометры-преобразователи

В области среднего вакуума ($1\text{--}10^{-1}$ Па) коэффициент теплопроводности газа заметно изменяется с давлением, хотя и не строго пропорционально последнему.

Эта закономерность и используется в манометрах описываемого типа. Техническая реализация данного физического явления заключается в следующем. Температура нити манометра поддерживается строго постоянной. Для этого к нити подводится постоянная электрическая мощность, пропуская через нее строго контролируемый электрический ток – так называемый «рабочий ток». В результате измерение вакуума при этом фактически сводится к измерению температуры нити 2 с помощью термопары 1. Отметим, что термоэлектрический манометр является одним из наиболее употребительных.

Устройство теплоэлектрического (термопарного) манометра и принципиальная электрическая схема его включения показаны на рис. 6.

В стеклянном или в металлическом корпусе 5, манометр присоединяется трубкой 3 к откачиваемому объему. Внутри корпуса манометра смонтирована термопара 2, спай которого посредством точечной сварки приварен к металлической нити 4, нагреваемой электрическим током, протекающим по ней от источника тока μA . Сила рабочего тока μA , протекающего через нить, поддерживается постоянной при помощи реостата R и контролируется миллиамперметром mA . Из-за нагрева спая термопары на ее концах возникает термоэлектродвижущая сила (mB), измеряемая гальванометром или электрометрическим усилителем.

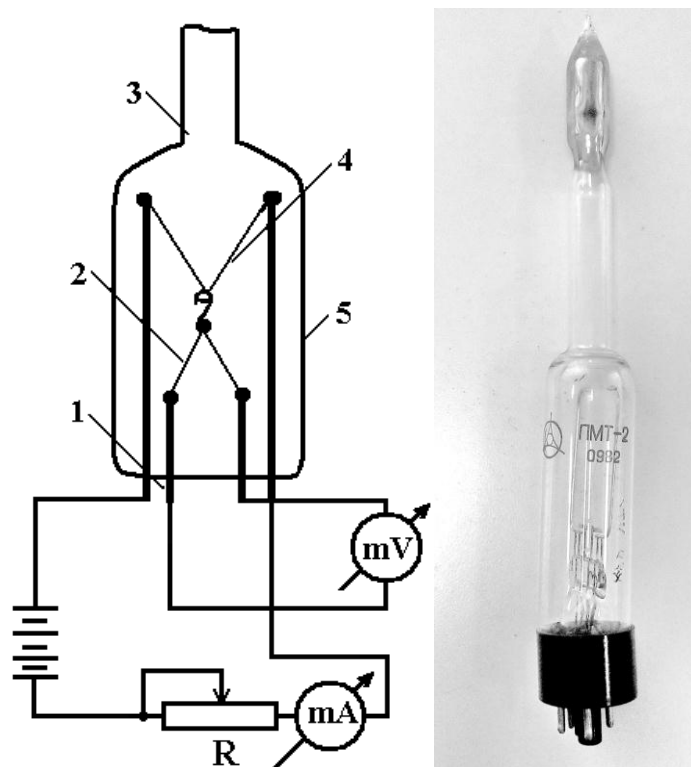


Рис. 6. Устройство, принципиальная электрическая схема включения и внешний вид (фото) термопарного манометра ПМТ-2:

- 1 – электрические вводы для подачи мощности (рабочего тока);
- 2 - термопара; 3 – трубка для напайки манометра к вакуумному откачному посту; 4 – нить, на которую подается постоянная электрическая мощность,
- 5 - стеклянная или металлическая колба

Как отмечено выше, значение термоэлектродвижущей силы непосредственно связано с давлением газа. При заданной силе тока в нагревателе температура спая термопары, которая определяет величину измеряемой термоэлектродвижущей силы, будет тем выше, чем меньше теплоотдача от спая наружу. Температура спая становится постоянной, т.е. устанавливается тепловое равновесие, когда мощность, выделяемая подогревателем, равна мощности, отдаваемой через газ. Теплоотдача же наружу тем больше, чем больше теплопроводность газа, т.е. чем выше давление. Отсюда следует, что величина термоэлектродвижущей силы, измеряемая прибором, тем больше, чем меньше давление газа.

К термоэлектрическому манометру (т.е. к манометрической лампе) обычно с техническим паспортом прилагается готовая градуировочная кривая - кривая зависимости измеряемой термоэлектродвижущей силы от давления газа, рис. 7.

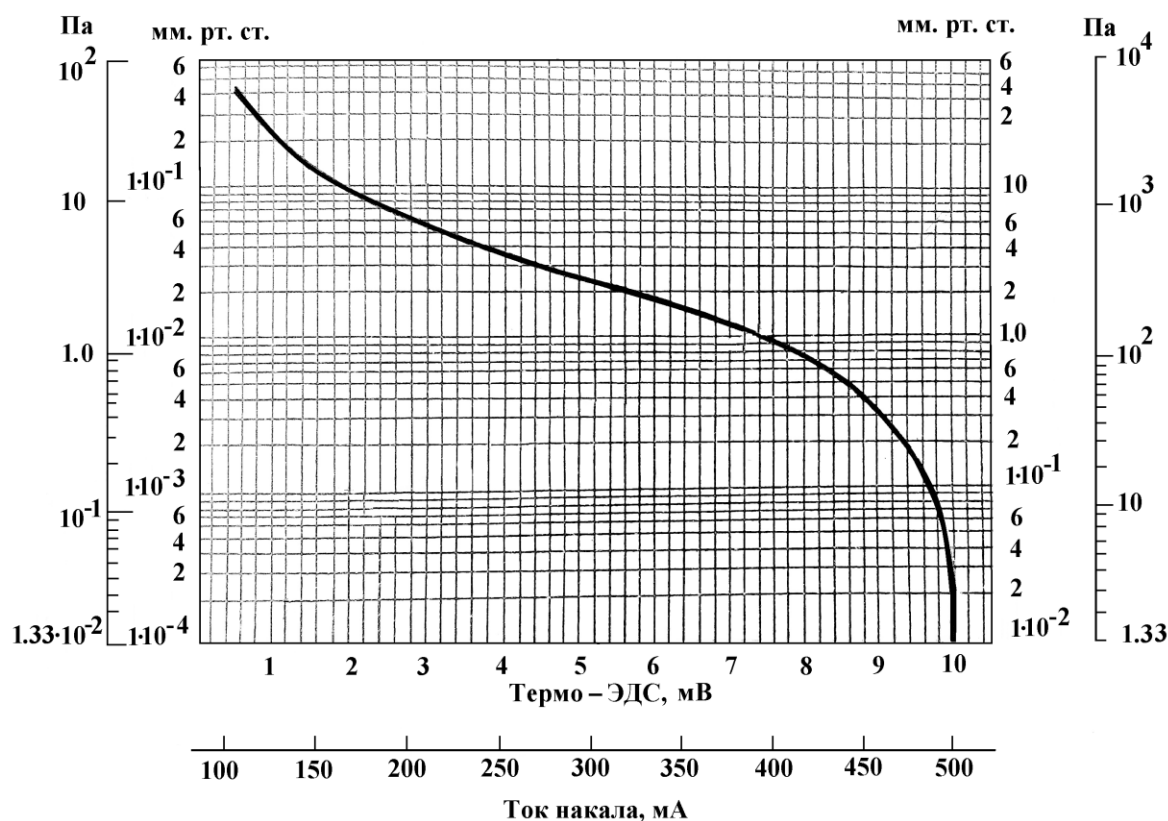


Рис. 7. Градуировочная кривая манометрического датчика ПМИ-2:
- кривая зависимости измеряемой термоэлектродвижущей силы (мВ) от
давления газа (в Па и/или в мм. рт. ст.)

Иногда на самом измерительном приборе наносится не только шкала термо - э.д.с, но и шкала давлений (эта шкала неравномерная).

Устройство и работа манометра

Для измерения вакуума необходимо произвести градуировку термopарного манометра. Обычно это делается с помощью компрессионного манометра Мак-Леода в специальных лабораториях. Более того, для работы отградуированного термopарного манометра необходимо вначале определить рабочий ток нити накала. Для этого до вскрытия и присоединения манометрической лампы к рабочей камере нужно (с помощью переменного сопротивления 3) менять ток в цепи 2, увеличивая его до тех пор, пока милливольтметр, в цепи которого измеряется температура нити 2, не покажет ЭДС, точно равный 10,0 мВ. После этого необходимо переключить тумблер «измерение – ток» в положение «ток нагревателя» и записать показание миллиамперметра. Это показание микроамперметра и будет рабочим током, которое необходимо запомнить, а затем постоянно поддерживать неизменным. Но, поскольку в процессе экс-

плутации вакуумной установки могут меняться параметры манометрического датчика (например, при авариях и т.п.), необходимо время от времени заново определять рабочий ток.

Таким образом, рабочий ток манометрической лампы ПМТ-2 определяется в вакууме заведомо лучше, чем 10^{-2} Па, т.е. измеряемый впоследствии данным манометром. Ясно, что в процессе эксплуатации лампы, когда измеряемый вакуум будет «хуже» 10^{-2} Па, подводимая постоянная мощность в цепи 4 будет сильнее рассеиваться остаточными газами в камере вследствие теплопроводности и показания милливольтметра будут всегда меньше, чем 10 мВ. Пользуясь градуировочной кривой на рис. 7, по показаниям милливольтметра определяется вакуум в откачиваемом объеме.

2.5. Ионизационные манометры

Принцип действия основан на том, что определенную часть молекул или атомов газа, давление которого подлежит измерению, ионизируют, т.е. превращают в положительно заряженные ионы. Под действием внешнего электрического поля возникает ионный электрический ток, сила которого измеряется соответствующим прибором (гальванометром, электрометрическим усилителем и т.п.). Если мощность ионизатора постоянна, то сила ионного тока I пропорциональна плотности ионов (т.е. числу их в единице объема); последняя, как известно, пропорциональна давлению газа P . Поэтому можно написать $I = k P$. Коэффициент пропорциональности k обычно устанавливается в специальных опытах и, зная его значение, получаем возможность определить давление газа по измеряемому току I .

Устройство ионизационного манометра схож с обычной трех-электродной усилительной лампой, рис. 8.

Вольфрамовый катод 1 окружен проволочной сеткой 2 из молибденовой проволоки. На никелевый цилиндр (анод) 3 обычно подается отрицательное напряжение и он служит коллектором ионов. На сетку 2 подается положительное напряжение. Известны и другие схемы, но описанный вариант включения манометра позволяет повысить чувствительность в несколько раз за счет того, что электроны совершают колебательное движение вокруг сетки и проходят больший путь, при котором возрастает вероятность ионизации молекул остаточных газов, чем по другим схемам.

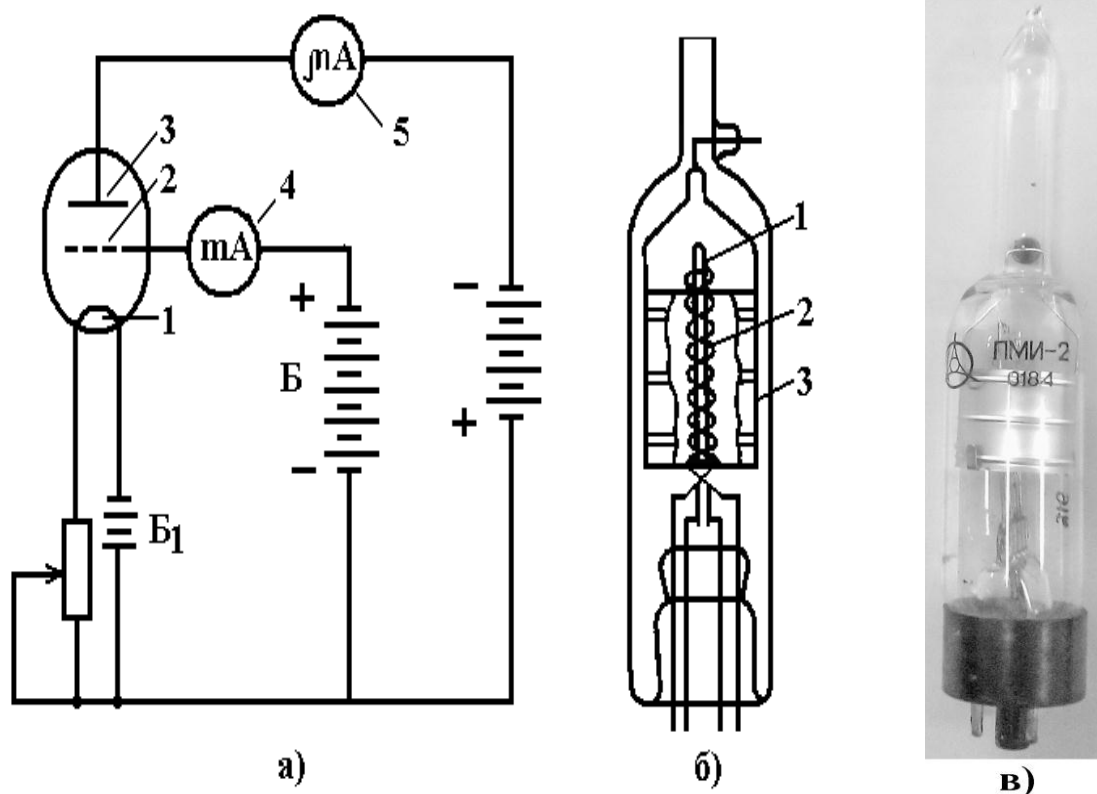


Рис. 8. Устройство, принципиальная электрическая схема включения и внешний вид (фотография) ионизационного манометра ПМИ-2
(пояснения – в тексте)

Диапазон давлений, измеряемых с помощью ионизационного манометра, составляет 10^{-1} – 10^{-6} Па. Ограниченность верхнего диапазона измеряемого данным типом манометра вакуумом $\sim 10^{-6}$ Па объясняется тем, что ионный ток становится настолько малым, что становится сравнимым с фототоком коллектора (последний возникает под действием мягкого рентгеновского излучения).

Электроны, ионизирующие газ, заполняющий лампу (давление его равно измеряемому), испускаются нитью накала, являющейся катодом. Ток накала поддерживается батареей B_1 .

Испущенные катодом 1 электроны ускоряются электрическим полем между катодом и сеткой 2, потенциал которой поддерживается положительным по отношению к катоду с помощью источника электродвижущей силы B .

Электроны, прошедшие сквозь сетку, ионизируют газ в пространстве между сеткой и коллектором 3, потенциал которого поддерживается отрицательным по отношению к сетке. Поэтому положительные ионы, образовавшиеся при ионизации газа, движутся к

коллектору, создавая ионный ток. Электроны же возвращаются назад к сетке. Сила ионного тока i измеряется микроамперметром μA .

Для того чтобы сила ионного тока была пропорциональна давлению газа, необходимо, чтобы сила электронного тока (т.е. мощность ионизатора) сохранялась постоянной. Постоянство силы электронного тока контролируется миллиамперметром mA .

Ионизационный манометр должен быть градуирован перед началом работы, т. е. должен быть определен коэффициент k , связывающий силу ионного тока с давлением газа. Для этого нужно измерить силу ионного тока при нескольких известных значениях давления, измеряемых другим манометром (например, абсолютным манометром Мак-Леода, см. выше).

Недостатком ионизационного манометра является зависимость его показаний от состава газа (коэффициент γ различен для разных газов). Ионизационным манометром можно измерять давления от 10^{-1} до 10^{-5} Па.

2.6. Манометры для измерения сверхвысокого вакуума

Возможность дальнейшего повышения верхнего предела измеряемого вакуума связано с уменьшением площади анода. Эта идея реализована в манометрах Баярда–Альперта и их отечественного аналога - ИМ-12, что позволило довести верхний предел измеряемого вакуума до 10^{-10} Па.

На рис. 9 показана принципиальная схема манометра ИМ-12 и его фотография для контроля сверхвысокого вакуума, позволяющий измерять вакуум до 10^{-9} Па.

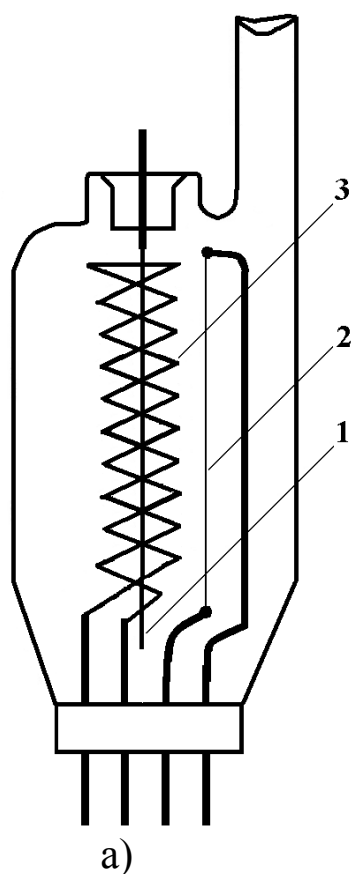


Рис. 9. Конструктивная схема электронного преобразователя: 1 – осевой коллектор, 2 – катод, 3 – сетка, имеющая форму бифилярной спирали с двумя выводами для обезгаживания путем пропускания электрического тока

В нем, в сравнении с ионизационным манометрическим датчиком ПМИ-2, реализовано обращенное расположение электродов: катод 2 – снаружи, а коллектор 1 – внутри сетчатого анода 3, при этом роль коллектора ионов выполняет тонкая вольфрамовая нить 1. Как видно на рис. 9а, угол видимости коллектора с поверхности сетки значительно уменьшен, поэтому рентгеновское фоновое излучение на него практически не попадает и фоновый ток очень мал. Напомним, что в ионизационном манометрическом датчике ПМИ-2 (рис. 8) электроны при торможении на сетке дают мягкое рентгеновское излучение, которое почти полностью попадает на цилиндрический коллектор, тогда как новая геометрия взаимного расположения электродов в манометрическом датчике ИМ-12 позволила повысить верхний предел измеряемого вакуума на два порядка.

Для прогреваемых металлических сверхвысоковакуумных установок предназначен манометрический датчик-преобразователь МИ-12-8 открытой конструкции, встраиваемый на фланце в вакуумную установку. Известны также магниторазрядные манометры, впервые

предложенные Пеннингом и поэтому называемые его именем. Сущность и работа этих манометров основана на использовании самостоятельного разряда в магнитном поле при высоком (несколько киловольт) напряжении на холодных электродах. Пределы измерения вакуума связаны с возможностью существования самостоятельного разряда при очень низких и высоких давлениях.

3. Основные методы и техника получения вакуума

3.1. Общие требования к вакууму

Для изучения поверхностных свойств веществ в конденсированном состоянии требуется сверхвысокий вакуум такого порядка, чтобы можно было исключить влияние адсорбированных частиц на исследуемые свойства (поверхностное натяжение, работу выхода электрона, смачиваемость и др.). При этом исходят из того, чтобы, в согласии с табл. 2, время образования монослойного покрытия было по возможности больше, чем время, необходимое для проведения самих измерений, поскольку в этом случае можно обеспечить атомарную чистоту исследуемых поверхностей. Проблема получения и поддержания высокого вакуума актуальна не только для развития науки и техники, но и практики производства, в частности, в электровакуумной промышленности. Действительно, большинство электровакуумных приборов требует создания и поддержания в них в течение всего периода эксплуатации высокого вакуума. Например, для нормальной работы электронных ламп давление в них должно быть не выше $10^{-4} \div 10^{-5}$ Па, а в электроннолучевых приборах требуется еще лучший вакуум. Наличие даже небольших количеств газа может сопровождаться преждевременным перегоранием нити накала, порчей катода, пробоями между электродами лампы или изменением ее начальных характеристик.

В связи с необходимостью повышения к надежности электровакуумных приборов, требования к рабочему вакууму повышаются еще больше. Экспериментально показано, что с улучшением вакуума понижаются фоновые шумы, повышается стабильность работы, улучшается качество катода и увеличивается срок службы электровакуумных приборов. Поэтому желательно, чтобы рабочий вакуум в очень ответственных приборах был не хуже $1 \cdot 10^{-9}$ Па.

Основными средствами, служащими для получения вакуума,

являются вакуумные насосы. Они разделяются на три основных класса:

Вращательные насосы (их так же называют механическими и форвакуумными насосами), создающие низкую и среднюю степень разрежения газа (до давления порядка $1 \cdot 10^{-1}$ Па).

Пароструйные насосы (их так же называют паромасляными, диффузионными), создающие высокую степень разрежения газа (до $1 \cdot 10^{-5}$ Па).

Сверхвысоковакуумные насосы, служащие для получения сверхнизких давлений, при помощи которых можно получить предельный вакуум порядка 10^{-13} Па. Отечественная вакуумная промышленность выпускает ряд сверхвысоковакуумных насосов (ГИН, ТРИОН, НОРД, НМД, СОН и др.).

3.2. Основные параметры вакуумных насосов

Любое устройство, служащее для откачки газа из какого-либо объема, т.е. для удаления из него молекул газа, называется насосом. Независимо от принципа действия, для характеристики вакуумных насосов вводится ряд параметров, главные из которых следующие:

1. Предельный вакуум (P_{np}) или остаточное давление – самое низкое давление, которое данный насос может обеспечить при откачке «на себя», т.е. с закрытым входным патрубком. Оно определяется динамическим равновесием откачиваемого потока газа и обратных (газоотделение с внутренних поверхностей насоса и т.п.) потоков.

2. Быстрота откачки насоса S – объем газа, удаляемого насосом в единицу времени при том давлении, которое существует на входе насоса, т.е.

$$S = \left(\frac{dV}{dt} \right)_p, [л/сек].$$

3. Начальное давление $P_{нач}$ – наибольшее давление на входе насоса, при котором он может начать работу. Например, для механических и адсорбционных насосов $P_{нач} = 1$ атм., т.е. они могут начинать работу с атмосферного давления, тогда как для пароструйных и геттерно-ионных насосов $P_{нач} \sim 1 \div 10^{-1}$ Па.

4. Наибольшее выпускное давление $P_{вып}$ – максимально допустимое давление на выходе насоса, при котором он нормально работает.

Обычно $P_{вып} \sim P_{нач}$.

3.3. Основное уравнение вакуумной техники

Используя предыдущие четыре определения параметров вакуумных насосов, основное уравнение вакуумной техники можно получить следующим образом.

Запишем S_0 - быстроту откачки вакуумного насоса в виде

$$S_0 = U(p_1 - p_2)/p_1;$$

$$S_n = U(p_1 - p_2)/p_2.$$

Далее

$$1/S_0 = p_1/U(p_1 - p_2); 1/S_n = p_2/U(p_1 - p_2).$$

Вычитывая из первого уравнения второе, получаем:

$$1/S_0 - 1/S_n = 1/U,$$

откуда

$$1/S_0 = 1/S_n + 1/U, \quad (12)$$

или

$$S = S_n U / (S_n + U) \quad (13)$$

Таким образом, последнее уравнение устанавливает связь между основными параметрами вакуумной системы - быстротой откачки, быстротой действия насоса и проводимостью вакуумного трубопровода. Поэтому оно получило название основного уравнения вакуумной техники.

Не существует насосов, которые могли бы откачать газ до давления порядка $1 \cdot 10^{-4}$ Па (или ниже) и выбрасывать откачиваемый газ в атмосферу, т.е. при противодавлении в 760 мм. рт. ст. Поэтому для создания достаточно низкого противодавления используются насосы предварительного разрежения, или, как их обычно называют, форвакуумные насосы. Форвакуумные насосы работают непосредственно против атмосферного давления. Их обычно соединяют последовательно с насосами, создающими уже требуемый высокий вакуум, -

Таблица 3. Различные типы вакуумных насосов и их основные параметры высоковакуумным насосом.

Тип насоса	Давление, Па		Быстрота действия, л/с
	полное	остаточное	
Водоструйные насосы	100 - 665	—	0,1 - 300
Многопластинчатые с масляным уплотнением:	200 - 330	200 - 330	2 - 1200
Одноступенчатые	2 - 6,6	0,27 - 0,66	0,5 - 500
Двухступенчатые	0,66 - 2	10^{-3} - $6,6 \cdot 10^{-2}$	0,2 - 50
Двухроторные насосы:			
Одноступенчатые	0,66	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$15 - 4 \cdot 10^4$
Двухступенчатые	10^{-3} - 10^{-2}	10^{-4} - 10^{-3}	5 - 50
Пароводяные эжекторные:			
Низковакуумные	100	-	$5 - 10^5$
Средневакуумные	10^{-1} - 1	-	$10^3 - 10^5$
Паромасляные:			
Бустерные	10^{-2}		$200 - 3 \cdot 10^4$
Диффузионные высоковакуумные	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$5 - 2 \cdot 10^5$
Диффузионные сверхвысоковакуумные	$6,6 \cdot 10^{-7}$	10^{-9}	$100 - 2 \cdot 10^5$
Парортутные насосы	-	$10^{-4} - 10^{-10}$	$5 - 10^4$
Турбомолекулярные	-	$10^{-7} - 10^{-9}$	$50 - 10^4$
Сорбционные насосы:			
Адсорбционные	-	$10^{-1} - 10^{-3}$	1-10
Испарительные геттерные	-	$10^{-7} - 10^{-11}$	$2 - 2 \cdot 10^4$
Геттерно ионные	-	$10^{-7} - 10^{-11}$	$2 - 5 \cdot 10^4$
Магнитные электроразрядные	-	$10^{-7} - 10^{-9}$	$2 - 10^4$
Криогенные насосы:			
Конденсационные	-	$10^{-7} - 10^{-9}$	$50 - 10^5$
Криосорбционные	-	$10^{-10} - 10^{-13}$	$500 - 10^5$

Для получения вакуума используется большое количество разнообразных вакуумных насосов, которые по принципу действия можно условно разделить на три группы: механические, пароструйные и сорбционные, (табл. 3). Каждый тип насосов, указан-

ных в табл. 3, предназначен для получения вакуума в определенном интервале разрежений, рис. 10. Это обусловлено как техническими характеристиками каждого из насосов, так и, главное, теми конкретными физическими явлениями и процессами, которые заложены в основу принципа работы того или иного типа насоса.

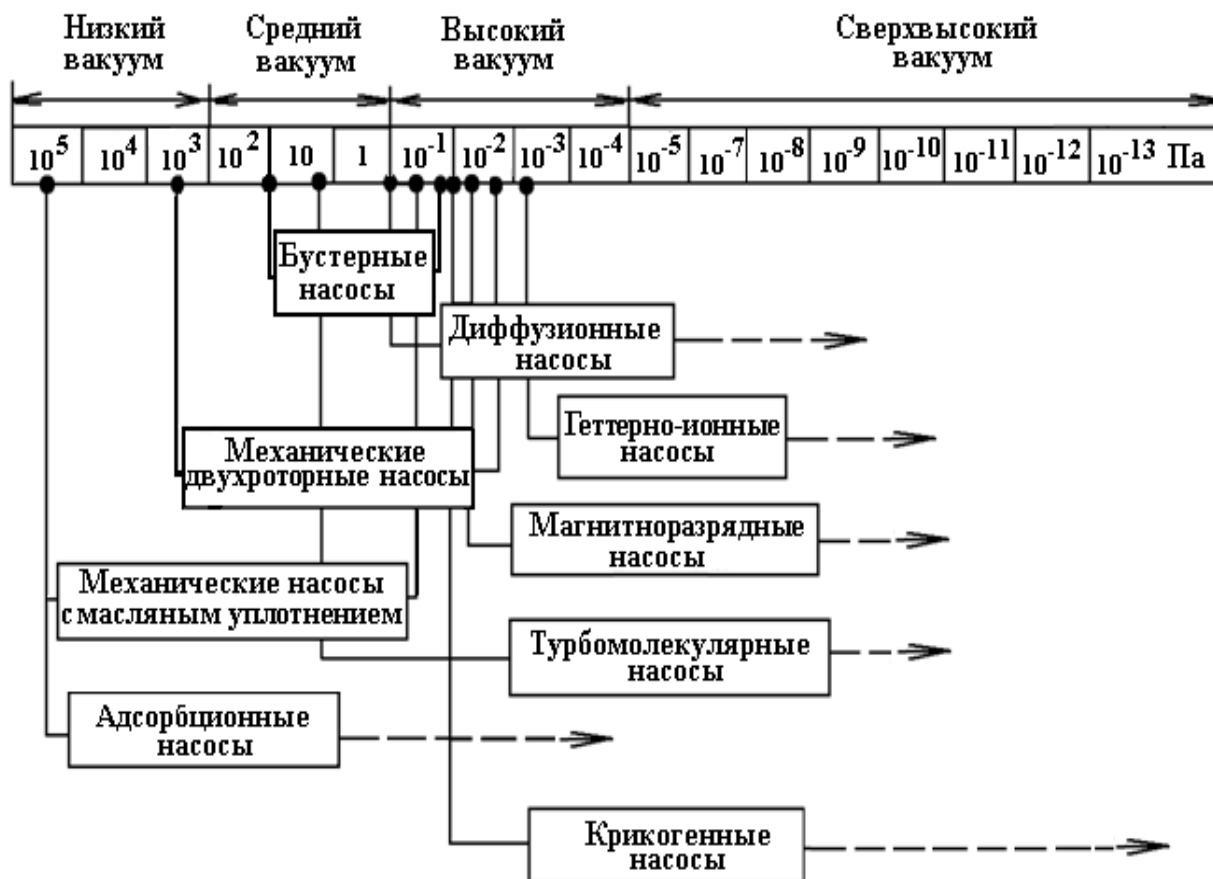


Рис. 10. Интервалы разрежений и основные типы вакуумных насосов для их получения

3.4. Механические вращательные насосы

Механические насосы бывают двух основных типов – объемные и молекулярные. Среди объемных насосов наибольшее распространение получили насосы масляно - ротационного типа. Для получения первой ступени разрежения – низкого вакуума, обычно используются механические ротационные насосы.

Пароструйные насосы (их так же называют паромасляными и диффузионными), создают высокую степень разрежения газа (до $1 \cdot 10^{-5}$ Па).

Сверхвысоковакуумные насосы, служат для получения сверхнизких давлений, при помощи которых можно получить

предельный вакуум порядка 10^{-13} Па. Ее в семидесятых годах прошлого века началась разработка и выпуск отечественной промышленностью серии диодных магниторазрядных насосов типа НЭМ с быстротой действия от 30 до 6500 л/с: НЭМ-30-2, НЭМ-100-2, НЭМ-300-1, НЭМ-1Т-1, НЭМ-2-5Т-1, НЭМ-7Т-1, которые позволили получать предельный вакуум 10^{-8} Па. Следует отметить, что насосы НЭМ нашли большое применение в электронной промышленности, в ускорительной технике, в физических лабораториях.

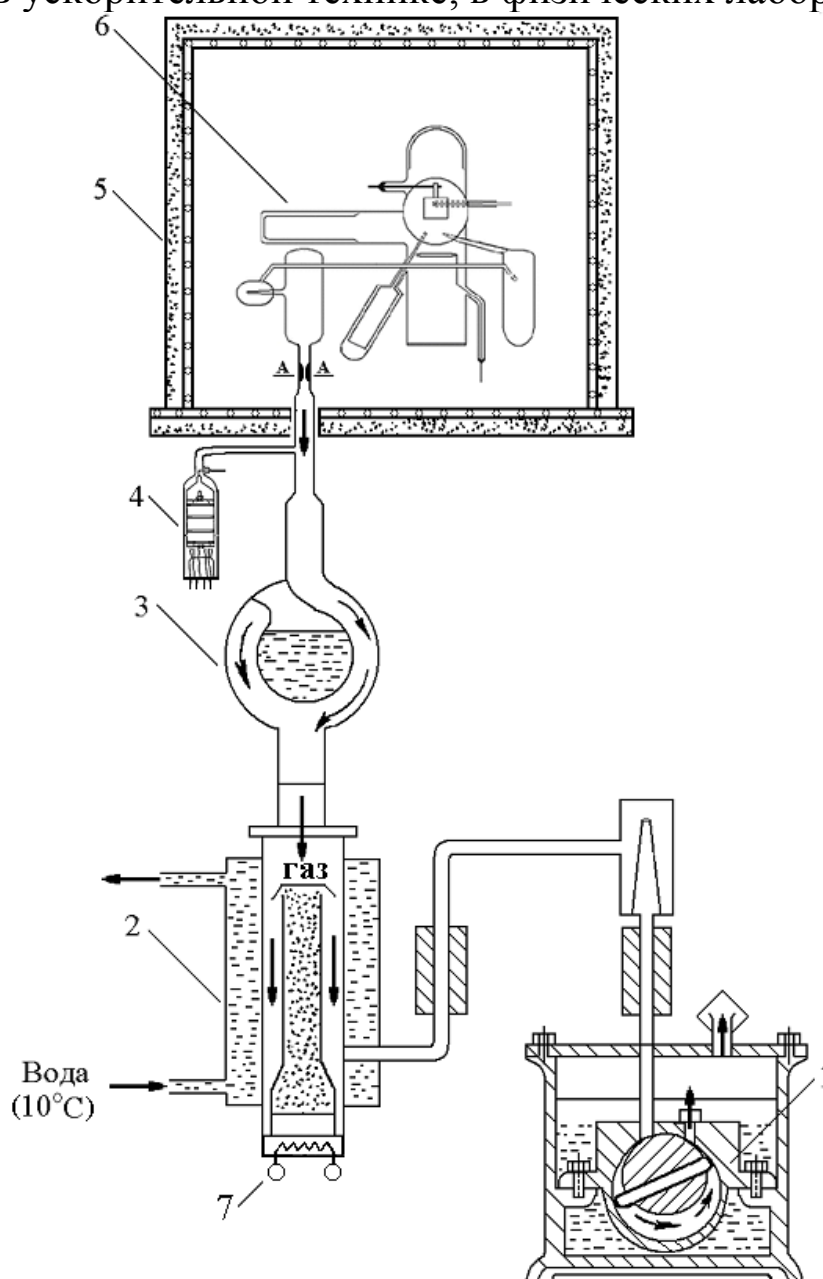


Рис. 11. Принципиальная схема вакуумной установки для получения среднего и высокого вакуума: 1 – механический (форвакуумный) насос; 2 – паромасляный насос; 3 – азотная ловушка; 4 – манометрический датчик; 5 – печь для термообработки; 6 – откачиваемый объем (измерительная ячейка); 7 – печь-нагреватель паромасляного насоса.

Типовая вакуумная установка для получения среднего вакуума состоит обычно из двух последовательно соединенных механического (1) и пароструйного (паромасляного) насосов (2), рис. 11. Для исключения попадания паров вакуумного масла в откачиваемый объем 6 (например, в измерительную ячейку, расположенную в термостате 5 с регулируемой температурой) служит азотная ловушка 3.

Механические вращательные насосы подразделяются на три основные группы:

- а) Пластинчато – статорные насосы, рис. 12;
- б) Пластинчато – роторные насосы, рис. 13;
- в) Золотниковые насосы, рис. 14.

3.4.1. Пластинчато – статорные вакуумные насосы

Пластинчато – статорные насосы (рис. 12) позволяют получать более высокий предельный вакуум, чем пластинчато – роторные (рис. 13). Золотниковые насосы (рис. 14) по сравнению с первыми двумя группами обладают большей быстротой действия.

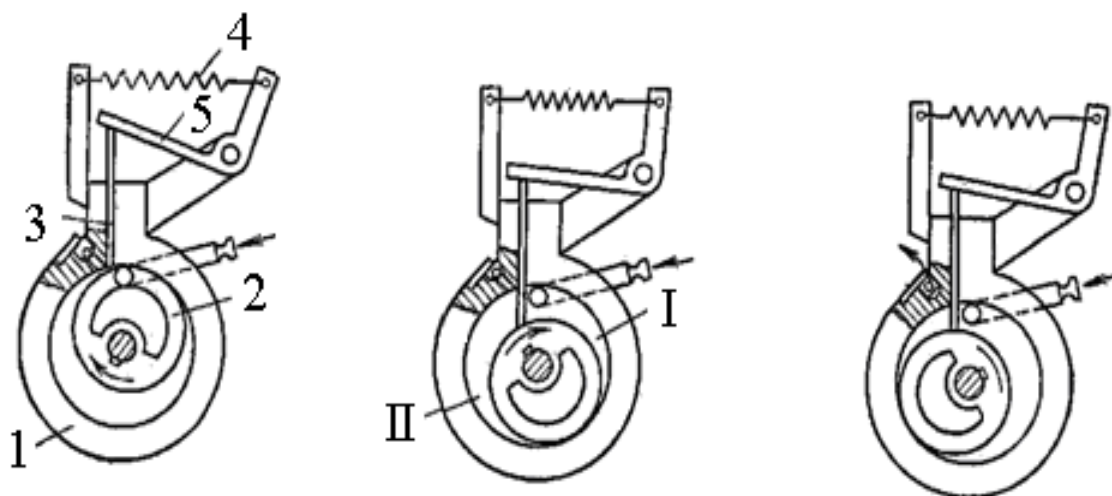


Рис. 12. Пластинчато – статорные насосы: 1 - цилиндрическая камера; 2 – эксцентрично расположенный ротор, 3 – пластина, 4 – пружина; 5 – рычаг.

На рис. 12 представлена схема типового пластинчато – статорного насоса. В нем движущаяся возвратно-поступательно пластина 3 и разделяющая полости всасывания 1 и сжатия 11, скользит в прорези статора 1, прижимаясь к ротору 2 под действием пружины 4 посредством рычага 5. Стрелки на рис. 12 указывают направление откачиваемых газов внутри корпуса насоса.

3.4.2. Пластинчато – роторные вакуумные насосы

Процесс откачки в пластинчато-роторных насосах основан на механическом всасывании и выталкивании газа вследствие периодического изменения объема рабочей камеры, образуемой цилиндром и движущимися частями насоса ротором и пластинками.

На рис. 13 схематически показан вакуумный насос пластинчато-роторного типа. Заметим, что первый насос такого типа был создан еще в 1912 г.

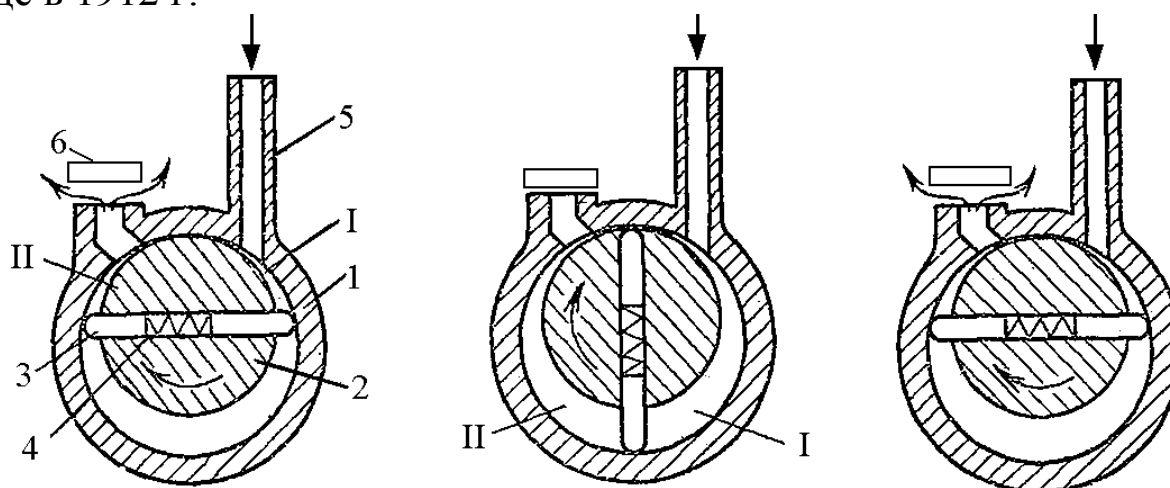


Рис. 13. Схема пластинчато – роторного насоса: 1 - цилиндрическая камера; 2 – эксцентрично расположенный ротор, 3 – пластина, 4 – пружина, 5 – патрубок, 6 - клапан

В цилиндрической камере 1 насоса вращается в направлении, указанном стрелкой, эксцентрично расположенный ротор 2, в прорези которого вставлены пластины 3 с пружиной. При вращении ротора пластины свободно скользят по внутренней поверхности цилиндра, и в камере насоса образуются две полости переменного объема: I (полость всасывания) и II (полость сжатия). Полость всасывания I при вращении ротора увеличивает свой объем, и в нее поступает газ из впускного патрубка 5, связанного с откачиваемым объемом. Объем полости сжатия II, расположенный на выпускной стороне, уменьшается при вращении ротора, и в ней происходит сжатие газа.

Эта полость соединена с клапаном 6. Когда давление газа в полости II станет достаточным для открытия клапана, произойдет выхлоп. Выхлопной клапан находится под уровнем масла, что препятствует попаданию атмосферного воздуха в насос. В процессе работы зазоры в роторном механизме уплотняются рабочей жидкостью насоса – маслом, благодаря чему обратное перетекание газа с выхо-

да на вход становится ничтожно малым. Масло заполняет и так называемые вредные пространства, из которых газ вытесняется при работе роторного механизма (например, объем под клапаном), и исключает их влияние, ведущее к повышению остаточного давления. Одновременно масло обеспечивает смазку и частичное охлаждение механизма насоса. Масло поступает в камеру насоса через зазоры и сверления в корпусе из маслорезервуара. Такую же роль масло выполняет и в других типах насосов с масляным уплотнением.

3.4.3. Золотниковые вакуумные насосы

Схема золотникового (плунжерного) насоса показана на рис. 14. В цилиндрической камере 1 вращается эксцентрик 2 с надетым на него плунжером 3. Газ из откачиваемого объема поступает в полость всасывания через окно 5 в прямоугольной части плунжера, который скользит в направляющей 6, свободно поворачивающейся в гнезде корпуса. При повороте эксцентрика 2 на некоторый угол от верхнего положения (рис. 14 б) окно 5 в прямоугольной части плунжера выходит из направляющей 6 вниз и полость всасывания соединяется с впускным патрубком насоса и газ поступает в полость всасывания (рис. 14 в), непрерывно увеличивающую свой объем, пока окно 5 не будет снова перекрыто (рис. 14 г).

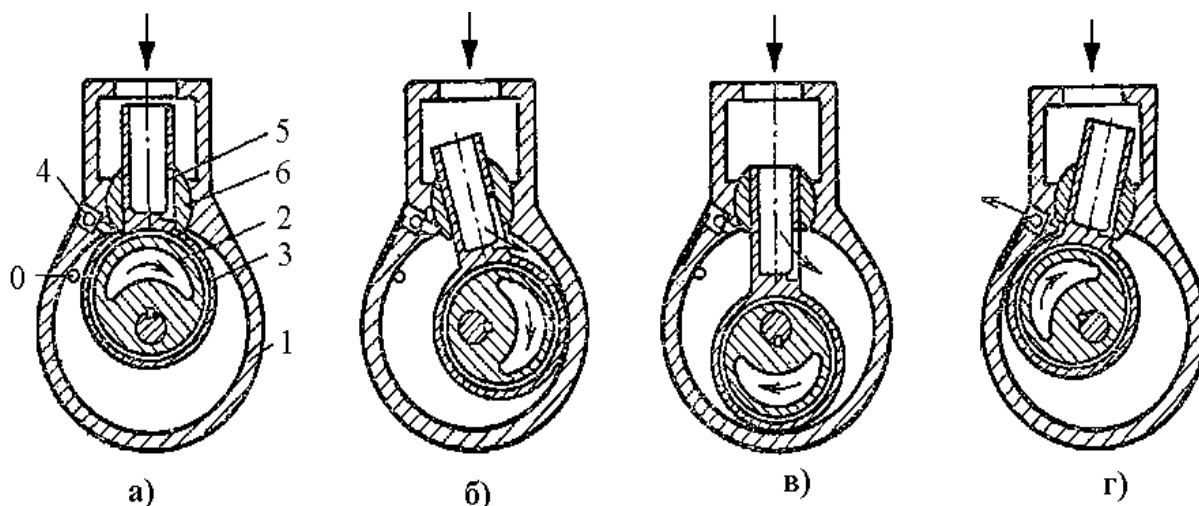


Рис. 14. Золотниковые насосы: 1 – цилиндрическая камера; 2 – эксцентрик с надетым на него плунжером 3; 4 – клапан; 5 – окно в прямоугольной части плунжера; 6 – направляющая

Одновременно в полости сжатия происходят сжатие и выталкивание газа через выхлопной клапан 4. Процесс напуска газа через окно напоминает работу золотникового распределительного

устройства, поэтому насосы такого типа получили название золотниковых.

Кроме указанных типов механических насосов существуют также специальные: многопластинчатые насосы - для откачки газов из больших объемов; газобалластные насосы - для откачки газов с большим содержанием различных паров и т.д.

В турбомолекулярных насосах (формально они также относятся к вращательным механическим насосам, но, в отличие от рассмотренных выше вращательных форвакуумных насосов, предназначены для получения сверхвысокого вакуума) откачка газов осуществляется за счет сообщения молекулам газа импульса, направленного к выходному патрубку (рис. 15).

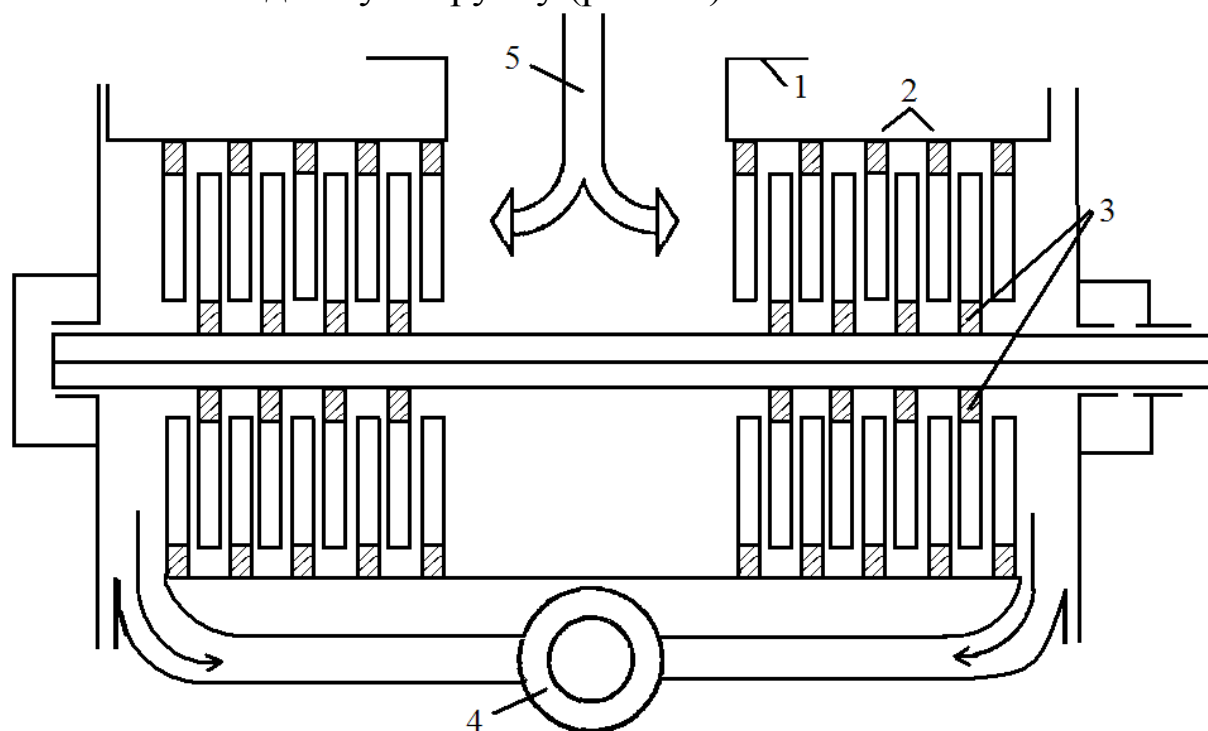


Рис. 15. Схема турбомолекулярного насоса марки ТВН-300: 1 – корпус, 2 – статорные диски, 3 – роторные диски, 4 – выпускной патрубок, 5 – впускной патрубок

3.5. Цеолитовый вакуумный насос (агрегат) ЦВА-1-2

Цеолитовый насос ЦВА-1-2 предназначен для откачки воздуха и других хорошо поглощаемых цеолитом газов и паров (O_2 , N_2 , Ar , H_2O) в вакуумных системах в диапазоне давления $1 \cdot 10^{-3}$ – $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па.

Технические данные

Габаритные размеры ЦВА-1-2, не более:

длина –	60,82 м
ширина –	0,96 м
высота –	1,17 м
Масса агрегата ЦВА-1-2, не более.....	67 кг
Предельное остаточное давление, не более.....	$1 \cdot 10^{-2}$ Па
Время откачки воздуха из 100 литрового объема до давления $1 \cdot 10^{-2}$ Па, не более	2 часов
Максимальная электрическая мощность, потребляемая ЦВА-1-2, не более.....	0,460 кВА
Марка адсорбента цеолит	CaEN-4B
Количество адсорбента.....	$2 \pm 0,1$ кг
Расход воды, подаваемой в агрегат ЦВА-1-2.....	$1 \pm 0,01$ м ³ /ч
Расход жидкого азота не более:	
На предварительное охлаждение.....	0,006 м ³
В установившемся режиме.....	0,00025 м ³ /ч

Агрегат ЦВА-1-2 при доверительной вероятности 0,8 имеет следующие показатели надежности:

- а) наработка на отказ, Т, не менее1000 ч
- б) средний ресурс, Тр, не менее.....21000 ч
- в) среднее время восстановления, Тв., не более8 ч.

Устройство и работа вакуумных насосов ЦВН-1-2

Агрегат ЦВА-1-2 состоит из следующих основных узлов (рис. 16): 1 - двух цеолитовых насосов, 2 - водоструйного насоса ВВН-2-2 с вентилем 10, трубопровода 3, двух вентилях 4, вакуумметра 5, поддерживающей стойки с поворотной траверсой 6, электронагревателя 7, сосуда Дьюара 8 и рамы 9.

Насос ЦВН-1-2 представляет собой цилиндрическую торовидную капсулу (корпус), заполненную адсорбентом. Материал корпуса насоса – сталь 12Х18Н. Насос ВВН-2-2 состоит из корпуса с соплом 14, сливным баком и вентиля ВРП25-2. Материал насоса - сталь 12Х18Н10Т и сталь 20.

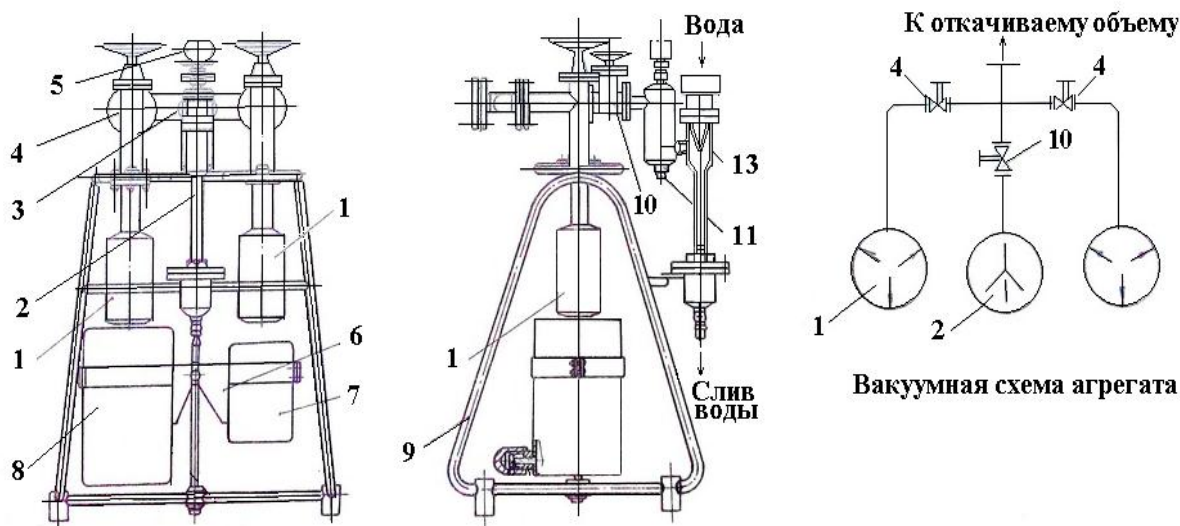


Рис. 16. Схема агрегата ЦВА-1-2: 1 - цеолитовые вакуумные насосы ЦВН-1-2; 2 - водоструйный насос ВВН-2-2; 3 – трубопровод; 4 - вентили; 5 – вакуумметр; 6 - поддерживающая стойка с поворотной траверсой; 7 – электронагреватель; 8 - сосуда Дьюара; 9 – рама; 10 – вентиль водоструйного насоса ВВН-2; 13 – корпус насоса ВВН-2 с соплом; 14 – штуцер

Принцип действия

а) Принцип действия агрегата ЦВА-1-2 основан на комбинации эжекторной откачки водоструйного насоса ВВН-2-2 и адсорбционной откачкой

цеолитовыми насосами ЦВН-1-2.

б) Питание нагревателя агрегата ЦВА-1-2 осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В.

в) Для эксплуатации агрегата ЦВА-1-2 необходимы вода водопроводная и жидкий азот.

Указание мер безопасности

а) При работе с агрегатом ЦВА-1-2 не разрешается допускать к работе с агрегатом студентов, не ознакомившихся с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации и не прошедших инструктажа по технике безопасности.

б) Для подсоединения к заземляющему контуру агрегат ЦВА-1-2 имеет стальной болт, расположенный на раме агрегата. Около болта заземления нанесен знак $\perp$.

в) Не разрешается снимать и устанавливать нагреватель, когда он включен в сеть и находится в нагретом состоянии.

г) На корпусе нагревателя агрегата ЦВА-1-2 имеется знак  и надпись «Осторожно! Высокая температура!»

д) На корпусе сосуда Дьюара нанесен знак  и надпись «Осторожно! Жидкий азот».

Проверка готовности цеолитового насоса ЦВН-1-2 к работе

а) Насос ВВН-2-2 присоединить к магистральному водопроводу и к линии слива воды.

б) Траверсу 6, несущую нагреватель 7 и сосуд Дьюара 8, установить в верхнем положении, при этом вентили 4 и 10 закрыты.

в) Поменять местами сосуд Дьюара 8 и электронагреватель 7 и произвести регенерацию цеолита во втором насосе ЦВН-1-2.

Регенерацию цеолита одного из насосов ЦВН-1-2 можно вести параллельно с работой (откачкой) другого насоса ЦВН-1-2, а также с запуском и работой водоструйного насоса.

Порядок работы

а) Запустить в работу водоструйный насос ВВН-2-2, для чего необходимо закрыть штуцер 15 (рис. 16) резиновой пробкой 11 и пустить воду в сопло 14 вентилем магистрального водопровода;

б) Под насос ЦВН-1-2 подвести сосуд Дьюара 8 (рис. 17);

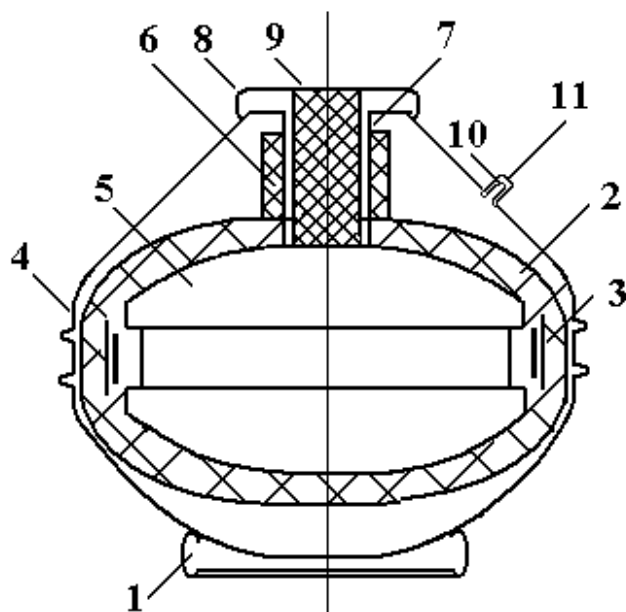


Рис. 17. Схема сосуда Дьюара: 1 – подставка; 2 – теплоизоляция; 3 – адсорбент; 4 – кожух; 5 – внутренний сосуд; 6 – поглотитель воздуха; 7 – горловина; 8 – крышка; 9 – пробка; 10 – трубка вакуумирования; 11 – колпачок

в) В сосуд Дьюара порциями заливается жидкий азот до прекращения интенсивного кипения, указывающего на то, что стенки насоса, сосуда Дьюара и цеолит, находящиеся в насосе, достаточно хорошо охладились.

г) Для откачки рабочей камеры плавно открыть ventиль 10 (рис. 16) и вести откачку до получения давления $1,3 \cdot 10^3 - 2,666 \cdot 10^3$ Па (10-20 мм. рт. ст.).

д) Довести уровень жидкого азота до верхней кромки наружного цилиндра насоса. Плавно открыть на насосе ЦВН-1-2 ventиль 4 (рис. 16) и вести откачку рабочей камеры. В сосуд Дьюара периодически доливать жидкий азот из расчета, чтобы уровень жидкости находился не ниже верхней кромки наружного цилиндра насоса.

е) В случае непрерывной длительной откачки, насосы ЦВН-1-2 в работу и регенерацию цеолита включать попеременно, т.е. один насос откачивает рабочую камеру, а другой - на регенерации и т.д.

Остановка насоса-агрегата ЦВН-1-2:

а) Закрыть ventиль 4 (рис. 16), соединяющий насос ЦВН-1-2 с откачиваемым объемом.

б) Прекратить заливку жидкого азота в сосуд Дьюара 8.

в) При возникновении необходимости замены цеолита в насосе ЦВН-1-2 произвести следующую работу:

- снять насос агрегата ЦВН-1-2;
- освободить насос от отработанного цеолита;
- тщательно промыть насос;
- загрузить насос свежим горячим цеолитом, прошедшим 20-часовую регенерацию на атмосфере при температуре 473 ± 50 К (200 ± 50 °С);

- сразу после загрузки цеолита насос подсоединить к ventилю 4;

г) В случае ухудшения предельного остаточного давления агрегата ЦВА-1-2 проверить герметичность соединений агрегата и устранить негерметичность подтяжкой соединений или заменой уплотнителей.

3.6. Пароструйные (диффузионные) вакуумные насосы

Для получения высокого вакуума используются пароструйные насосы (их также называют паромасляными и диффузионными), создающие разрежение до 10^{-5} Па. В отличие от ротационных механических насосов, пароструйные насосы могут работать только

при условии создания для них предварительного разрежения ($0,1-10^{-1}$ Па). Поэтому для получения высокого вакуума используются одновременно последовательно соединенные механический вращательный и паромасляный насосы, как показано на рис. 11. Работа пароструйных насосов основано на увлечении молекул газа из откачиваемого объема быстрой направленной струей паров, в качестве которой используется вакуумное масло различных марок (см. Прил. 1а). Струя паров рабочей жидкости создается в результате подогрева (температура около $400\text{ }^{\circ}\text{C}$) специальной печью, плотно пристыкованной к нижней части насоса, в которой находится рабочая жидкость, рис. 18.

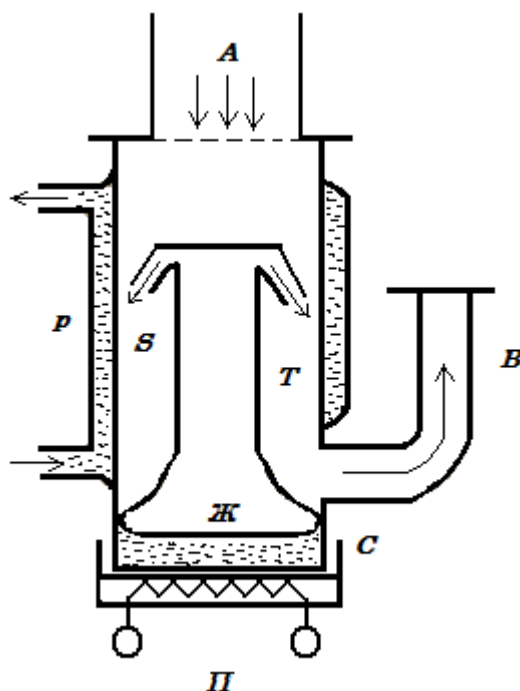


Рис. 18. Схема паромасляного (диффузионного) насоса
(пояснения – в тексте)

Различают три вида пароструйных насосов – эжекторные (низковакуумные), бустерные (средневакуумные) и диффузионные (высоковакуумные).

В отличие от механических форвакуумных насосов, в высоковакуумных диффузионных насосах нет движущихся механических частей. Как отмечено выше, их также называют диффузионными, поскольку их действие связано с диффузией частиц откачиваемого газа в струю пара.

Высоковакуумные насосы этого типа могут работать только при достаточно низком противодавлении, которое и обеспечивается механическими форвакуумными насосами. Поэтому диффузионный насос соединяется последовательно с форвакуумным так, что вы-

хлоп диффузионного насоса присоединяется к входному патрубку форвакуумного, как это показано выше на рис. 11.

Устройство паромасляного диффузионного насоса схематически показано на рис. 18. На дне металлического сосуда **С** находится испаряющаяся жидкость **Ж** (вакуумное масло). Испарение его обеспечивается электрическим нагревателем **П**, т.е. печью сопротивления.

Откачиваемый объем присоединяется к верхнему концу насоса **А**, а его выходной патрубок **В** - к входной трубе форвакуумного насоса (не показанного на рис. 18). После того, как форвакуумный насос создаст нужное давление в насосе и в откачиваемом объеме, включается нагреватель-печь **П** и жидкость **Ж** начинает интенсивно испаряться. Пар поднимается по трубе **Т**, помещенной над жидкостью, и с большой скоростью выбрасывается из сопла **С**, которым заканчивается труба **Т**, а затем конденсируется на холодных охлаждаемых стенках и стекает вниз на дно сосуда, стенка которого окружена «рубашкой» **Р**, в которой протекает холодная (10 °С) вода. Нагреватель и холодильник насоса обеспечивают, таким образом, непрерывную циркуляцию пара.

Молекулы откачиваемого газа, поступающие из области **А**, увлекаются струей пара, выбрасываемого из сопла, переносятся в нижнюю часть насоса, где они попадают в патрубок **В**, и удаляются форвакуумным насосом в атмосферу.

Основное назначение струи пара вакуумного масла сводится к тому, чтобы передать часть своего импульса (количества движения) молекулам откачиваемого газа и направить их вниз, к выхлопной трубе. Давление газа на выхлопе высоковакуумного насоса равно давлению, создаваемому форвакуумным насосом, т.е. примерно 1 Па.

Предельное давление, до которого может быть откачан сосуд, соединенный с **А**, определяется главным образом упругостью паров рабочей жидкости при температуре охлаждающей воды выше сопла.

Поэтому в качестве рабочей жидкости высоковакуумных насосов выбирают такие сорта масел, у которых упругость собственных паров при комнатной температуре мала (см. Прил. 1б).

Рассмотрим механизм действия пароструйного насоса. На рис. 19 показана часть сопла **С** и прилегающей к нему охлаждаемой стенки корпуса насоса.

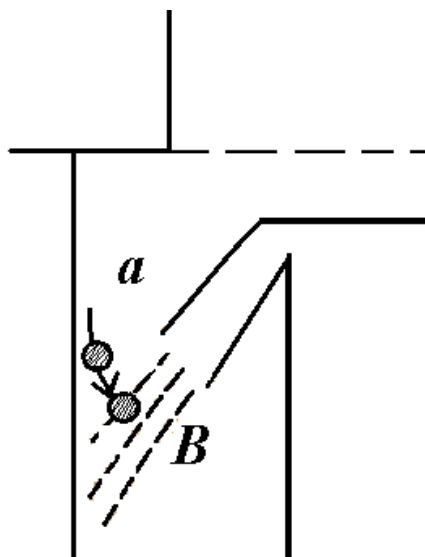


Рис. 19. Механизм действия пароструйного (диффузионного) насоса

Давление в откачиваемом объеме до начала действия насоса уже достаточно мало, чтобы длина свободного пробега молекул была сравнима с размерами входного патрубка *A*, соединяющего насос с откачиваемым объемом. Это значит, что молекулы газа практически не испытывают столкновений друг с другом. Во всяком случае, столкновения молекул с внутренними стенками насоса происходят чаще, чем их взаимные столкновения. При этих условиях единственной причиной попадания той или иной молекулы газа в насос, например молекулы *a* (рис. 19), является случайное совпадение направления скорости этой молекулы с направлением сверху вниз, т.е. от области *A* к струе пара *B*.

Другими словами, откачиваемый газ диффундирует из откачиваемого сосуда (объема) к струе пара (именно поэтому насосы этого типа и называются диффузионными). Если в результате столкновения молекулы *a* с молекулой пара в струе она попала внутрь струи, то она практически уже не может возвратиться обратно, так как давление пара в струе достаточно велико; оно достигает значения до 10 Тор. При таком давлении с обратной диффузией молекул газа можно не считаться. Это и значит, что молекулы газа «увлекаются» струей.

Некоторые молекулы газа, столкнувшись с молекулами пара, могут приобрести скорость, направленную прочь от струи. Но это не значит, что они не будут откачаны, так как при одном из следующих столкновений они все же получат нужное направление движения.

Тот факт, что некоторые молекулы получают при столкновении с молекулами пара скорость, направленную обратно к входному патрубку, лишь несколько уменьшает скорость откачки. Работу насоса определяют не эти сравнительно редкие случаи, а то обстоятельство, что молекулы откачиваемого газа, диффундировавшие внутрь струи, уже практически возвратиться назад не могут. А так как скорость диффузии в вакууме очень велика, то пароструйные насосы обладают весьма значительной скоростью откачки.

Молекулы, попавшие в струю пара, либо непосредственно выбрасываются ею в сторону форвакуума, либо ударяются о стенку, на которой происходит конденсация пара. При этой конденсации захваченный струей пара газ освобождается и тоже удаляется форвакуумным насосом.

Обычно пароструйные насосы имеют не одно, а несколько сопел (большой частью 2-3), действующих последовательно (многоступенчатые насосы).

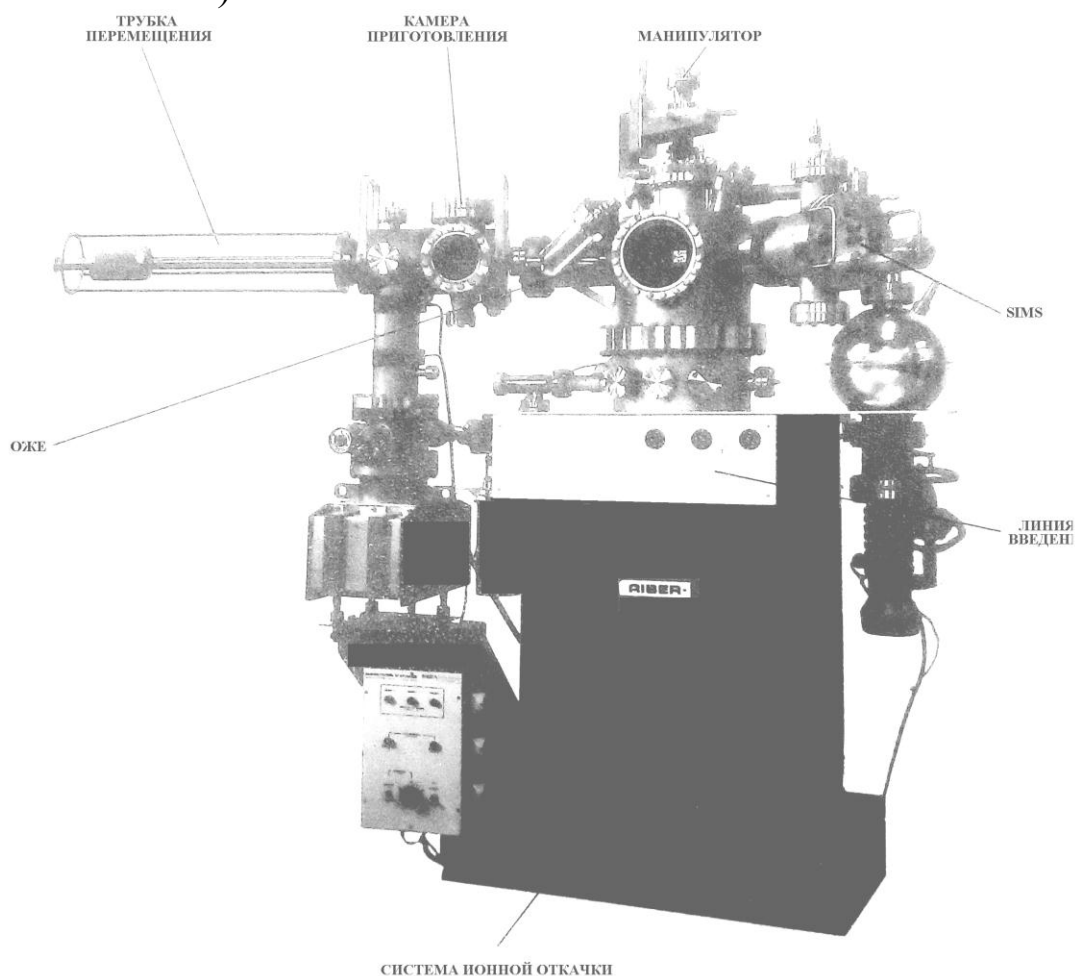


Рис. 20. Сверхвысоковакуумная установка для анализа поверхностей конденсированных веществ электронно-спектрометрическими методами, снабженная шлюзовой камерой (трубка перемещения) для быстрой загрузки исследуемых образцов

В частности, широко используемый отечественный паромасляный высоковакуумный насос ЦВЛ-100 имеет повышенную быстроту действия ($125 \div 140$ л/сек). Его особенность - наличие в первой ступени эжекторного сопла.

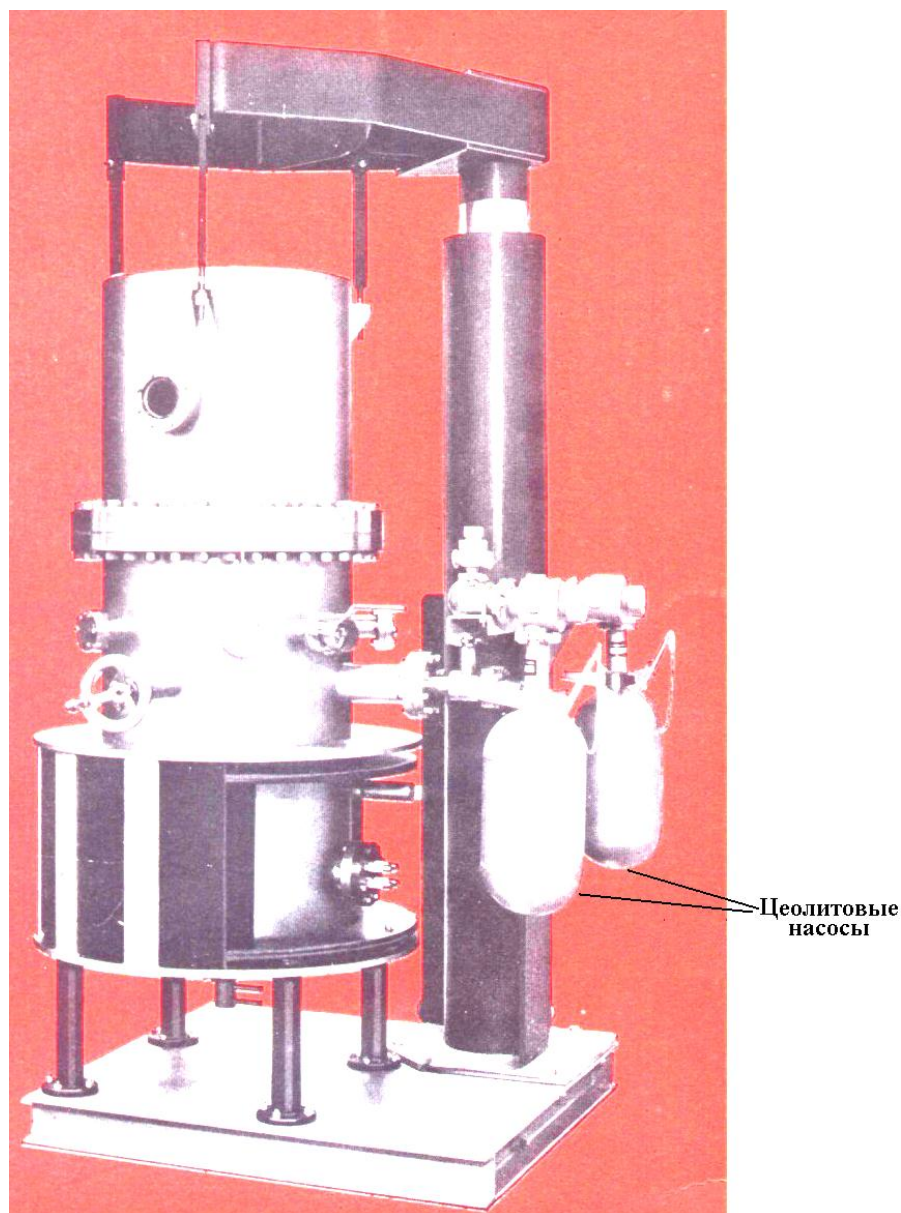


Рис. 21. Полностью безмасляная сверхвысоковакуумная установка с термостатом. Предварительное разрежение в установке создается двумя цеолитовыми насосами, охлаждаемые жидким азотом

Насос имеет три ступени разрежения, что позволяет работать при большом выпускном давлении (27 Па). Насос дает предельное разрежение около 10^{-4} Па без вымораживающей ловушки.

Современные диффузионные насосы позволяют производить откачку до давления порядка 10^{-3} - 10^{-6} Па. Но столь высокий вакуум

можно получить лишь при условии полной герметичности всей вакуумной системы. Необходимо также, чтобы поверхности откачиваемого сосуда и других частей вакуумной системы не выделяли газы (не «газили»). Обоим этим условиям, особенно второму, очень трудно удовлетворить на практике.

3.7. Вакуумная техника для получения сверхвысокого вакуума

В настоящее время разработана разнообразная вакуумная техника для создания сверхвысокого вакуума и его поддержания, а также созданы приборы и аппаратура для измерения очень малых давлений газа. При помощи современных откачных устройств (например, криосорбционных насосов, см. табл. 3) удалось получить в лабораторных условиях вакуум порядка 10^{-13} Па.

Внешний вид сверхвысоковакуумной экспериментальной установки, снабженной современными средствами контроля исследуемых поверхностей электронно-спектроскопическими методами (Оже-электронные спектрометры для определения химического состава, ДЭНЭ-приставкой для контроля структурных превращений в поверхностных слоях кристаллов методами дифракции электронов низких энергий и т.п.) показан на рис. 20,21.

На рис. 22 представлена сверхвысоковакуумная установка для термовакуумной обработки и заправки измерительных ячеек жидкометаллическими расплавами (лаборатория физики межфазных явлений физического факультета КБГУ).

Следует отметить, что наибольшие трудности сопряжены именно с получением и поддержанием сверхвысокого вакуума. Для этой цели используются геттерно-ионные, магниторазрядные диодные, турбомолекулярные, криосорбционные и др. насосы, т.е. так называемые безмасляные средства откачки.



Рис. 22. Сверхвысоковакуумная установка для термовакuumной обработки и заправки измерительных ячеек жидкометаллическими расплавами (лаборатория физики межфазных явлений физического факультета КБГУ)

3.7.1. Турбомолекулярные сверхвысоковакуумные насосы

В семидесятых годах прошлого века были разработаны первые отечественные сверхвысоковакуумные турбомолекулярные насосы типа ТВН-200, ТВН-500, ТВН-2000 и ТВН-5000 с предельным вакуумом 10^{-7} Па и быстротой действия 200 – 5000 л/с, а также агрегаты на их основе (ТВА-200 и др.).

О принципе работы турбомолекулярных насосов упоминалось

выше в разделе, посвященном общему описанию механических вращательных насосов. Напомним, что он заключается в том, что молекулы откачиваемого газа, соударяющиеся с поверхностью очень быстро вращающегося ротора, получают импульс в направлении движения поверхности ротора.

В результате молекулы газа увлекаются ею и между концами Bn и $Вып$ (впускного и выпускного) патрубков создается разность давлений.

Рассмотрим более детально особенности работы этого типа насосов, формально относящиеся к механическим вращательным насосам, но предназначенные для получения сверхвысокого вакуума. Как известно, при низких давлениях газа отношение выпускного ($p_{вып}$) и впускного ($p_{вп}$) давлений на концах патрубков насоса определяется выражением:

$$p_{вып} / p_{вп} = e^{bV}, \quad (14)$$

где b - коэффициент, зависящий от природы газа и размеров канала в статоре, V – линейная скорость поверхности диска вращающегося ротора.

Из (14) видно, что отношение $p_{вп} / p_{вып}$ тем больше, чем больше скорость вращения ротора. При достаточно высокой скорости вращения давления газа могут отличаться на три и более порядка. Величина отношения $p_{вп} / p_{вып}$ не зависит от $p_{вып}$, поэтому предельный вакуум $p_{вп}$ тем лучше, чем ниже давление газа $p_{вып}$ на стороне предварительного разрежения. Газ из откачиваемой рабочей камеры проходит по узким каналам в статоре 2, рис. 23. Вне канала поверхность статора плотно прилегает к поверхности ротора.

На рис. 23 показана конструкция современного турбомолекулярного насоса. Здесь ротор 1 выполнен в виде диска. Он не имеет подшипников и удерживается в заданном положении системой магнитной подвески, состоящей из соленоида 2 с сердечником 3, погруженным в сосуд с маслом 4, и датчика 5, регистрирующего положение ротора. Сигнал с датчика поступает на специальную электронную схему для управления током соленоида.

Благодаря системе магнитной подвески и высокой прочности материала ротора, скорость его вращения может достигать чрезвычайно больших значений (до 200000 оборотов в минуту и выше).

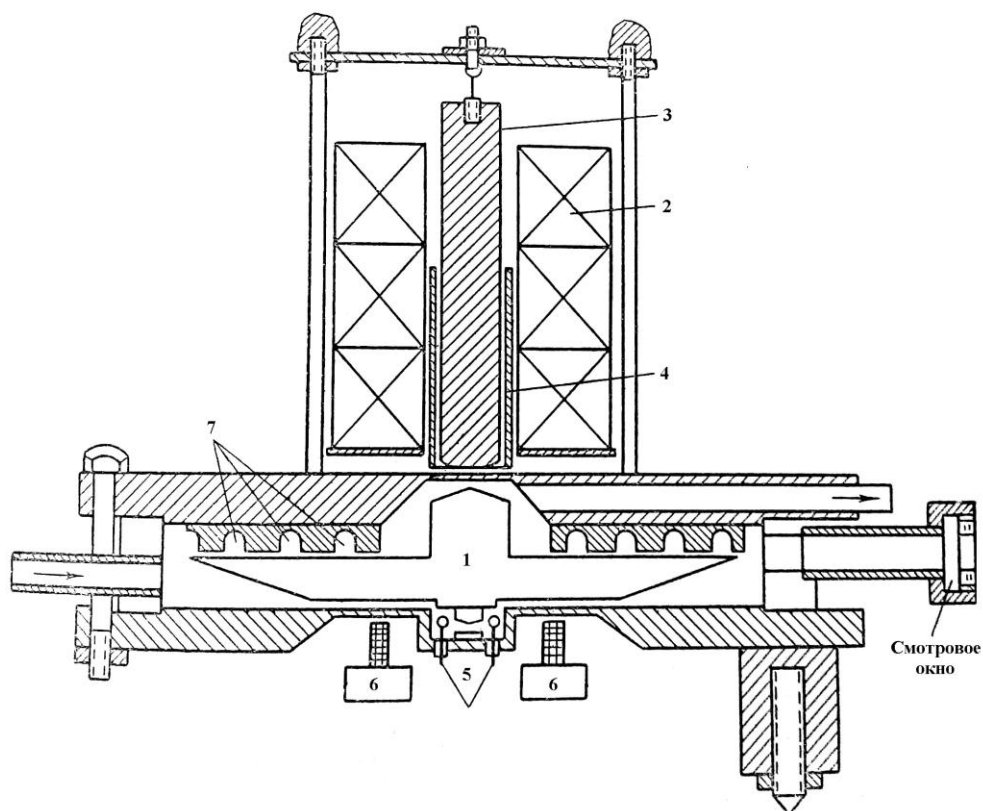


Рис. 23. Турбомолекулярный насос: 1 – ротор на магнитной подвеске, 2 – соленоид, 3 – сердечник, 4 – сосуд с маслом, 5 – датчик положения ротора, 6 – катушки с протекающими токами, 7 – каналы в статоре

Ротор приводится в движение вращающимся магнитным полем, которое создается токами, протекающими через катушки 6. Движение газа происходит по узким каналам 7 в статоре. Газ тормозит вращение ротора, однако сила торможения ничтожно мала. Отметим, что при давлении газа $1 \cdot 10^{-5}$ Па ротор вращается по инерции в течение нескольких дней. При разработке насоса предусмотрен его прогрев для обезгаживания деталей при температуре 400°C .

Турбомолекулярные насосы имеют быстроту действия от 140 до 4000 л/с и создают предельный вакуум от $1 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-9}$ Па.

Достоинства турбомолекулярных насосов:

- а) Откачивает все газы и пары жидкостей;
- б) Работает без вымораживающих ловушек;
- в) В рабочей камере насоса отсутствуют вещества, которые могли бы вызвать загрязнения вакуумной системы (см. Прил. 2).

Недостатком турбомолекулярного насоса является необходимость высокой степени разрежения газа на стороне

низкого предварительного вакуума $p_{вып}$ для получения предельно-возможного вакуума.

В отличие от турбомолекулярных и рассмотренных выше механических вращательных и диффузионных насосов, принципиальной особенностью геттерно- ионных, магниторазрядных и криосорбционных насосов является то, что они не перекачивают газ из объема в атмосферу, а поглощают (сорбируют) его на внутренних поверхностях («криопанелей»), охлаждаемых до криогенных температур или специально напыляемых поглотительных пленках, например, титана и др.

Различают три вида сорбционных насосов:

1. Адсорбционные насосы, в которых используются в качестве рабочих тел различные пористые поглотители (цеолиты, активированный уголь и т.д.).
2. Геттерные (хемосорбционные) насосы, в которых откачка газов производится за счет связывания (хемосорбцией) их пленкой титана и других элементов.
3. Конденсационные (криогенные) насосы, в которых обеспечивается откачка газов в результате конденсации частиц газа на поверхностях, охлажденных до низких (водородных и гелиевых) температур.

Два последних типа сорбционных насосов применяются для получения сверхвысокого и, что особенно важно, чистого, «безмасляного» вакуума, т.е. свободного от паров различных органических соединений, которые обычно присутствуют в рабочей камере, откачиваемой насосами других типов, например, пароструйными.

Адсорбционные насосы

Ряд веществ обладают способностью поглощать, или, как говорят, сорбировать, значительные количества газов. Типичным примером таких сорбентов служит уголь, способность которого поглощать тяжелые газы давно используется в противогазах. Способность угля поглощать газы определяется, в основном, его очень развитой поверхностью, обусловленной пористой структурой. Для создания большой поверхности уголь подвергают специальной обработке (активируют). Особенно велика сорбционная способность угля при низких температурах. Этим свойством пользуются для откачки газов и поддержания уже достигнутого высокого вакуума.

Сорбционные цеолитовые насосы (см. рис. 16, 21) и агрегаты

предназначены для предварительной форвакуумной откачки систем с геттерно-ионными магниторазрядными насосами от 760 до 10^{-2} - 10^{-2} Па - (насосы ЦВН-0,1-2, ЦВН-1-2, агрегаты ЦВА-0,1-1, ЦВА-0,1-2, ЦВА-1-1, ЦВА-1-2).

Некоторые вещества обладают способностью поглощать вполне определенные газы благодаря тому, что они химически реагируют с ними, образуя твердые соединения. Таким свойством обладает, например, титан, который поглощает большие количества водорода. Это свойство титана используется в ряде устройств, где требуется откачивать водород. Вещества-газопоглотители часто называются геттерами. Данное явление положено в основу работы геттерно-ионных насосов (ГИН).

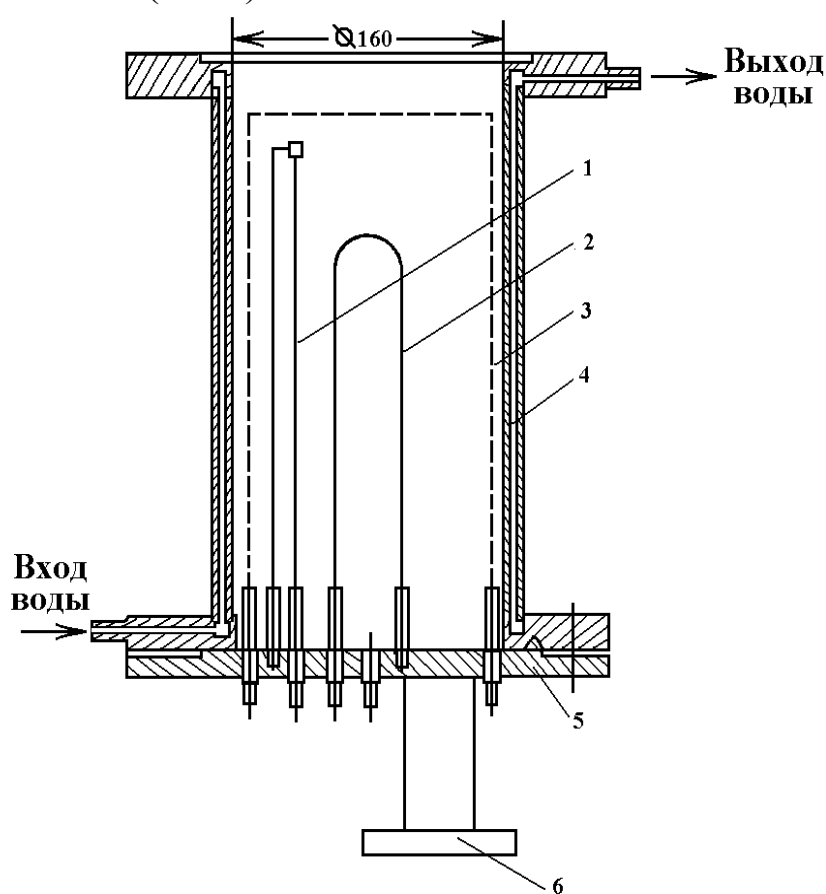


Рис. 24. Геттерно-ионный насос ГИН-05М1: 1 — вольфрамовый катод, 2 — испаритель титана, 3 — анод, 4 — корпус, 5 — фланец цоколя, 6 — патрубок для предварительной откачки

3.7.2. Геттерно-ионные сверхвысоковакуумные насосы

Геттерные (хемосорбционные) насосы. Откачка газов этими насосами производится за счет связывания (хемосорбции) их пленкой титана.

Различают геттерно-ионные (типа ГИН-05М, рис. 24) и магни-

торазрядные диодные (типа ТРИОН, НОРД, НМД, СОН) насосы, рис. 25.

В этих насосах обычно используются ионизирующие устройства для лучшей откачки инертных газов, т.к. последние не так хорошо хемосорбируются газопоглощающей пленкой титана, как остальные компоненты воздуха. Составы остаточных газов при откачке геттерно-ионными (ГИН-05М) и другими насосами (НОРД-250 и НМД) приведены в Прил. 2.



Рис. 25 Общий вид сверхвысоковакуумного магниторазрядного насоса НОРД-250

Насос ГИН – 0,5М имеет следующие параметры:

1. Быстрота действия насоса при давлении $1,333 \cdot 10^{-5}$ Па составляет 300 л/сек.
2. Предельный вакуум – около 10^{-7} Па.
3. Начальное давление, при котором насос ГИН – 0,5М начинает работать, $1 \cdot 10^{-2}$ Па.
4. Анодное напряжение насоса равно 1000 В, ток эмиссии – 300 мА.
5. Мощность, потребляемая насосом ГИН-0,5М, составляет около 1 кВт.

Насос ГИН – 0,5М представляет собой вакуумную камеру, внутри которой находится нагретый вольфрамовый катод 1, титановый испаритель 2 и анод 3. В этом насосе активное вещество полу-

чается путем испарения титана с титановых испарителей 2, нагреваемых электрическим током, а ионизация газа осуществляется электронным током с накаливаемого катода.

Из-за большой мощности, выделяемой при работе насоса, его корпус 4 охлаждается водой. При нагревании камеры во время ее обезгаживания вода выключается, так как температура обезгаживания насоса и откачиваемого объема достигает около 400 °С.

Пуск насоса ГИН-0,5М осуществляется следующим образом: вначале обычными средствами (сперва форвакуумным, затем пароструйным насосами) производится откачка газов из вакуумной системы и внутреннего объема насоса. Потом, в течении нескольких (4-5) часов, осуществляется обезгаживание вакуумной камеры и в течении 30 мин – титановых испарителей (при 50% мощности). После этого титановые испарители переводятся на полную мощность, включают накал катода и подают анодное напряжение и, только после этого, подают воду для охлаждения корпуса насоса.

3.7.3. Магнитно-разрядные вакуумные насосы

На рис. 25 представлен общий вид сверхвысоковакуумного магниторазрядного насоса НОРД-250 (Насос Орбитронный, Разрядный, Диодный с быстротой действия $S_n=250$ л/с), а его принципиальная схема – на рис. 26.

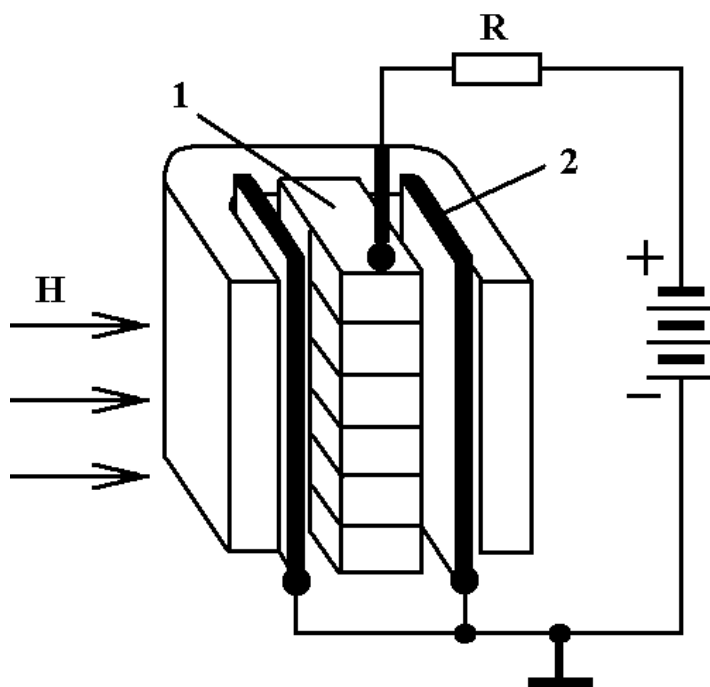


Рис. 26. Схема диодного магниторазрядного насоса с источником питания: 1 – анод, 2 – катод, R – балластное сопротивление, Н – направление магнитного поля.

3.7.4. Криогенные вакуумные насосы

Откачка газов этими насосами обеспечивается в результате конденсации частиц газа на поверхностях, охлажденных до низких (азотных, водородных и гелиевых) температур («криопанели»). Принципиальная схема устройства криогенного насоса показана на рис. 27. Криопанель 7 представляет собой объем, заливаемый рабочим хладагентом. Эта панель окружена охлаждаемыми жидким азотом (77 K) экранами 2. Емкость 1, охлаждаемая жидким азотом, не дает нагреваться до комнатной температуры крепежной горловине 8 криопанели. Для уменьшения теплового потока около горловины, последняя выполнена в виде тонкостенного сильфона 8 из нержавеющей стали, обладающей малой теплопроводностью. Такая конструкция уменьшает отвод тепла от корпуса криопанели и уменьшает расход жидкого гелия.

Экраны 2 служат для уменьшения теплового потока за счет тепловой радиации корпуса насоса (нагретого до температуры 293 K). Экраны сконструированы так, чтобы по возможности не было снижения скорости откачки крионасоса.

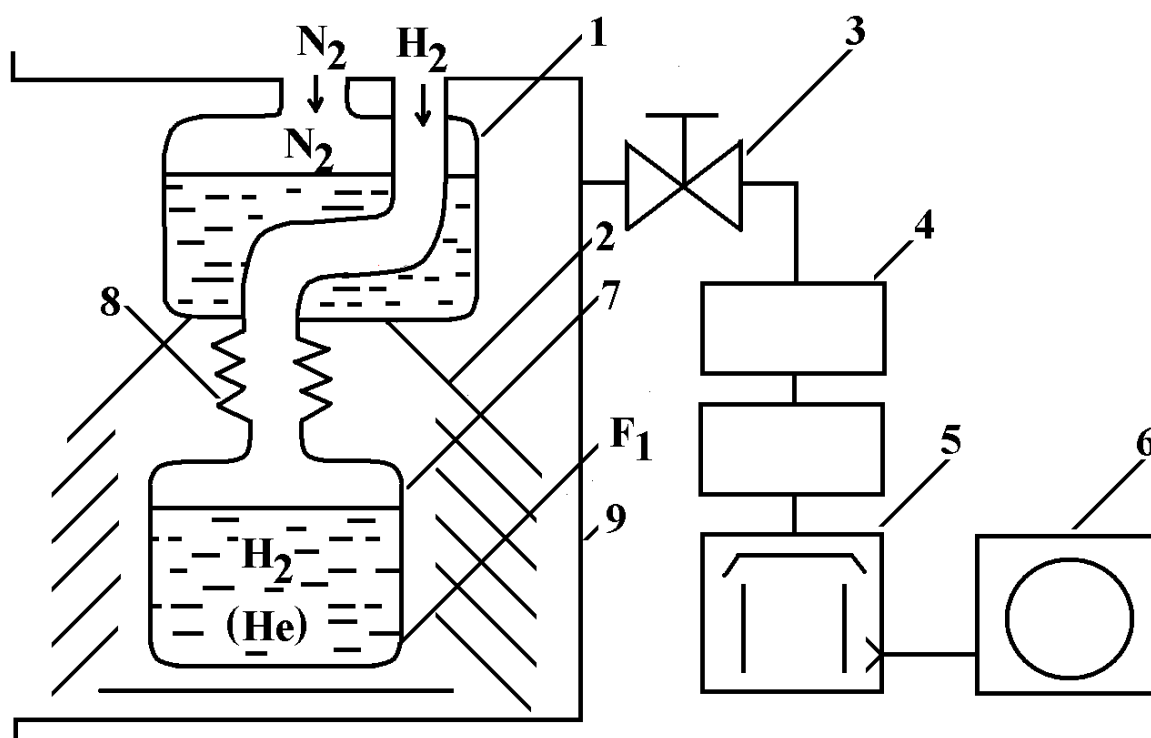


Рис. 27. Схематическое изображение устройства и работы криогенного насоса: 1 – емкость для жидкого азота; 2 – экраны; 3 – вакуумный вентиль; 4 – ловушки; 5 – диффузионный насос; 6 – форвакуумный насос; 7 – криопанель (емкость для жидкого гелия и/или водорода); 8 – сильфон (крепежная горловина); 9 – кожух насоса

Тепловые параметры хладагентов и криогенного насоса

Из диаграммы на рис. 28 следует, что гелий, испаряющийся внутри насоса (криопанели), где $P = 10^5$ Па, создает температуру 4,2 К, что соответствует точке «а» на диаграмме. При такой температуре давление насыщающих паров водорода составляет 10^{-5} Па (точка «b»), а давление насыщающих паров неона P_{Ne} равно $6 \cdot 10^{-18}$ Па (точка «с»). Давление насыщающих паров других газов при такой температуре еще меньше и практически не может быть измерено. Аналогично, жидкий водород, залитый в криопанель в качестве хладагента, создает температуру 20,4 К (точка «d»), при которой давление насыщающих паров для различных компонентов атмосферного воздуха составляет:

- для неона $P_{Ne} = 133$ Па (точка «e»),
- для азота $P_{N_2} = 3 \cdot 10^{-12}$ Па (точка «f»),
- для кислорода $P_{O_2} = 10^{-13}$ Па (точка «g»),
- для аргона $P_{Ar} = 10^{-17}$ Па (точка «k»).

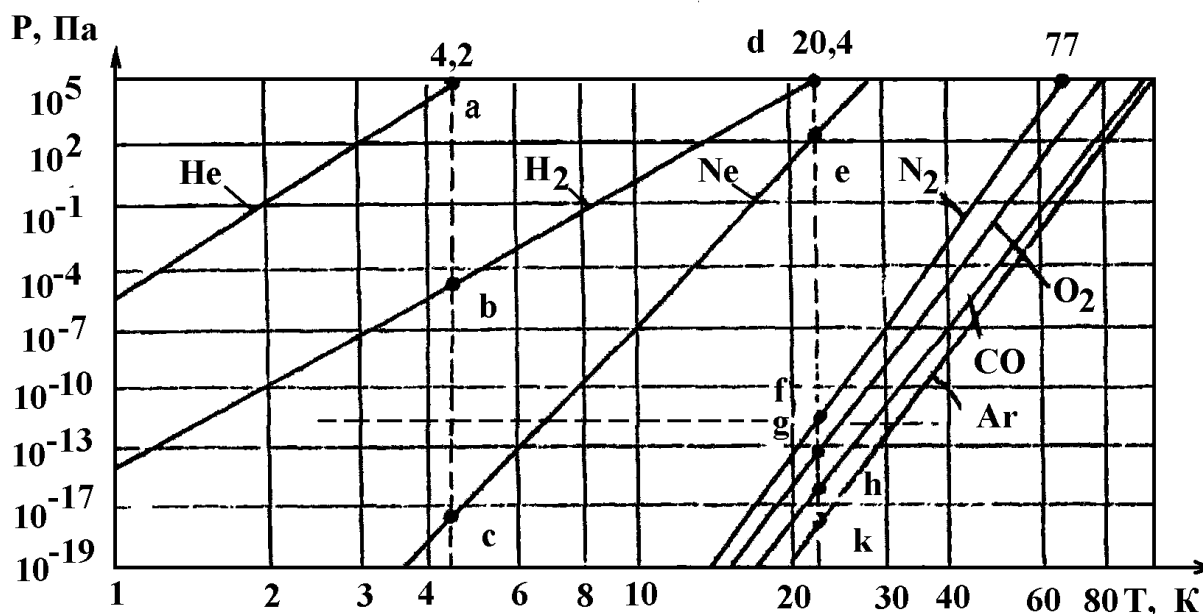


Рис. 28. Термические свойства низкотемпературных хладагентов

3.7.5. Спиральные вакуумные насосы (СВН) [18]

В 1905 году французский инженер Леон Круа предложил использовать две спирали с постоянным шагом, одну неподвижную, а другую скользящую внутри первой по орбитальной траектории, в роторных машинах. В дальнейшем инженеры и изобретатели неоднократно возвращались к этой идее. Однако существовавшие на тот момент технологии не могли обеспечить высокие требования по точности и производительности изготовления спиралей. Поэтому

более 70-ти последующих лет развитие спиральных машин шло в направлении теоретических исследований по оптимизации конструкции, уплотнений, подшипниковых узлов, технологичности производства, которые нашли отражение в очень большом количестве соответствующих патентов.

В начале 80-х годов прошлого века американские фирмы «Copeland Corp» и «Trane» практически одновременно с фирмой «Hitachi» (Япония) наладили промышленный выпуск спиральных компрессоров для систем кондиционирования. Чуть позже фирма «Volkswagen» (Германия) создала сухой спиральный компрессор для наддува автомобильных двигателей. Одновременно началось промышленное освоение спиральных вакуумных насосов (фирмы «Nortimetex» (Франция), «Iwata Air Compressor Company of Japan» (Япония), «Varian» (США)).

С каждым годом доля СПВН среди безмасляных средств откачки неуклонно растет, что говорит об объективных достоинствах спирального механизма. В частности, с помощью одноступенчатого спирального вакуумного насоса было достигнуто остаточное давление ~ 1 Па. Ни поршневые, ни винтовые, ни роторные вакуумные насосы сухого сжатия такого давления в одной ступени обеспечить не могут.

Конструкция и принцип действия СПВН

Спиральный вакуумный насос (СПВН) – это механический объемный насос внутреннего сжатия, в котором перемещение газов осуществляется за счет периодического изменения объема двух или более серповидных полостей, образованных между двумя повернутыми друг относительно друга на 180° спиралями, одной – неподвижной, второй – совершающей орбитальное движение. Принцип действия спирального механизма становится понятным при рассмотрении рис. 29. Две спирали, чаще всего эвольвентные, выполнены заодно с торцевыми дисками. Подвижная спираль 1 совершает орбитальное движение относительно центра неподвижной спирали с некоторым небольшим эксцентриситетом E (как правило, до 5 мм). Неподвижная спираль 2 жестко соединена с корпусом насоса и имеет отверстие нагнетания в центральной части. Подвижная спираль уравнивается противовесом 3. При движении спирали не касаются друг друга, поскольку между ними имеется небольшой зазор $\sim 0,05\text{--}0,1$ мм.

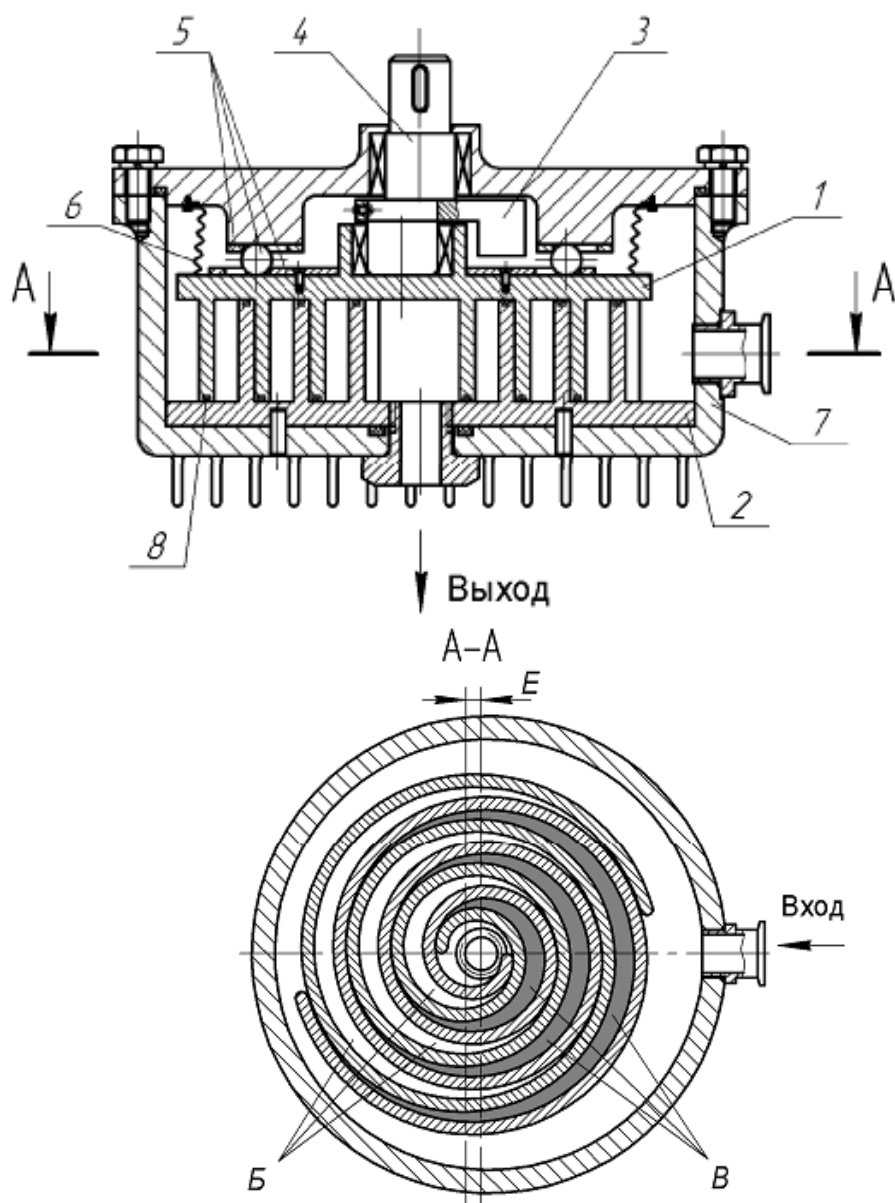


Рис. 29. Спиральный вакуумный насос: 1 – подвижная спираль; 2 – неподвижная спираль; 3 – противовес; 4 – эксцентриковый вал; 5 – противоповоротное устройство; 6 – сильфон; 7 – корпус; 8 – уплотнитель

Спирали в СПВН располагаются таким образом, что могут практически соприкасаться в нескольких точках, образуя при этом в случае однозаходных спиралей две серии серповидных объемов Б и В (рис. 29), которые при орбитальном движении подвижной спирали уменьшают свой объем от периферии спиралей к их центру.

Процесс всасывания газа начинается с образования двух серповидных полостей на периферийной части спиралей (полости 1 на рис. 30). Одновременно в насосе присутствует порция сжимаемого газа (полости 2). Процесс сжатия заканчивается объединением серповидных полостей 2 в центральной части спиралей в парную по-

лость 3, откуда происходит нагнетание газа через отверстие в центре торцевого диска неподвижной спирали.

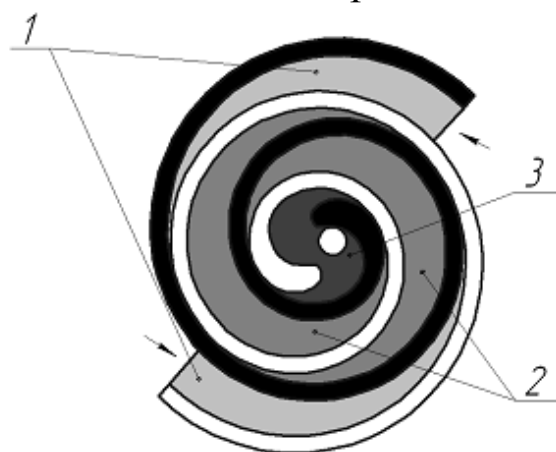


Рис. 30. Взаимное расположение спиралей

Таким образом, в спиральном вакуумном насосе процессы всасывания, сжатия и нагнетания происходят одновременно в нескольких полостях (рис. 29-31). При этом полость всасывания отделена от полости нагнетания промежуточными полостями, что снижает перетечки между полостями высокого и низкого давления и позволяет отказаться от всасывающего и нагнетательного клапанов. Количество оборотов, за которые осуществляется рабочий цикл с одной порцией газа, равняется количеству витков спирали. Захват одной порции газа осуществляется за один оборот приводного вала для всех видов СПВН.

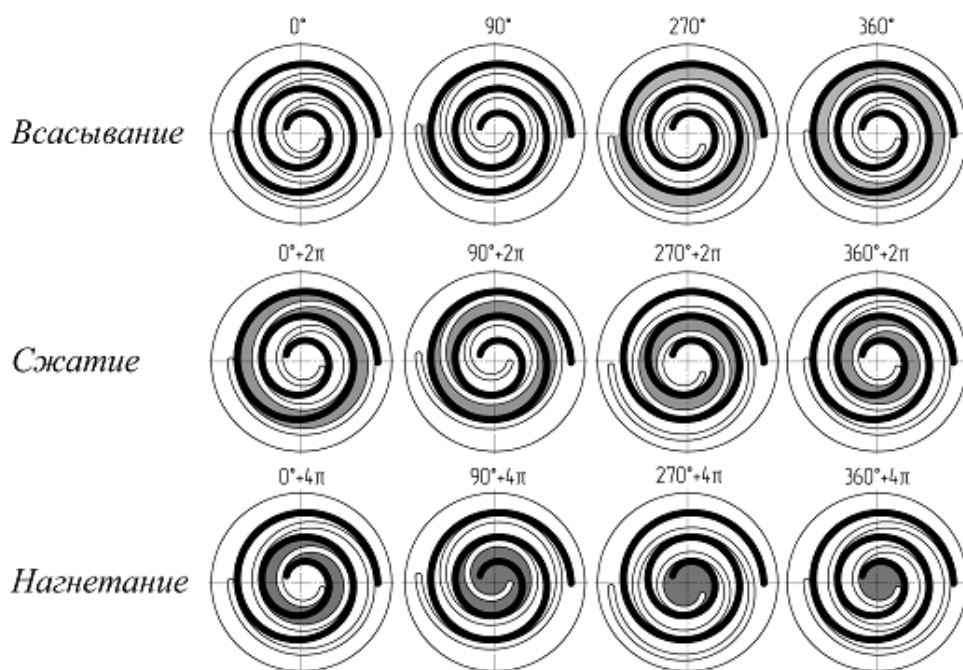


Рис. 31. Последовательное положение спиралей в процессе откачки

Как уже отмечалось, в качестве кривой, образующей спираль, чаще всего используется эвольвента. Также могут быть использованы спираль Архимеда, дуги окружностей и их комбинации.

Элемент, герметизирующий рабочую полость СПВН, может быть выполнен в виде манжеты на приводном валу (именно так, чаще всего, поступают в спиральных компрессорах). Однако в этом случае подшипники и противоположное устройство, требующие смазки, располагаются в вакуумной полости насоса. Поэтому в последние годы в конструкции спирального вакуумного насоса используется эластичный упругий элемент – сильфон большого диаметра 6 (рис. 29), герметично соединяющий подвижную спираль с корпусом насоса. Благодаря такой конструкции полностью предотвращается возможность проникновения паров масла в рабочую полость насоса и откачиваемый объем, и спиральный насос становится абсолютно безмасляным.

Для работы спирального механизма не требуется использование клапанов ни на входе, ни на выходе. Однако для предотвращения прорыва атмосферы в откачиваемый объем при аварийном отключении электричества можно использовать отсечной клапан на входе. В случае герметичного СПВН наряду с клапаном на входе необходимо использование и клапана на выходе из насоса. Герметичные спиральные насосы используются для откачки сильно агрессивных и особо дорогих газов, а также в технологических процессах с применением вакуума, не допускающих присутствия углеводородов.

Большинство спиральных насосов комплектуются встроенным газобалластным устройством, позволяющим производить откачку газовых сред с большим содержанием паров воды. Некоторые спиральные вакуумные насосы имеют продувку подшипниковых узлов для предотвращения конденсации паров воды и соответственно ухудшения условий смазки в подшипниках, например, при работе с криогенными насосами в период регенерации.

Достоинства спиральных вакуумных насосов

Важное преимущество спиральных насосов по сравнению с любыми другими объемными насосами – наименьшие потери на всасывании, что является следствием большого раскрытия полости всасывания и соответственно – малой скорости газа. Отсутствие мертвого пространства и малый подогрев газа на всасывании за

счет отсутствия контакта газа с сильно нагретыми частями насоса также повышают энергоэффективность СПВН. Процесс нагнетания также осуществляется с малыми газодинамическими потерями

К достоинствам спиральных вакуумных насосов можно отнести достаточно большую степень повышения давления в одной ступени по сравнению с другими бесконтактными вакуумными насосами, достигаемую за счет малых перетеканий между полостями всасывания, сжатия и нагнетания. Это обусловлено большим количеством замкнутых полостей между полостью всасывания и нагнетания и соответственно малыми перепадами давлений между ними, а также протяженными щелевыми каналами между спиральями, вследствие малой кривизны стенок, создающими большое сопротивление движению газа.

Благодаря малой скорости движения концевых уплотнений (менее 1 м/с) они подвергаются незначительному износу, что обеспечивает продолжительный ресурс их эксплуатации. Вследствие полного внутреннего сжатия, отсутствия трущихся частей в насосе и рабочей жидкости, которая создает дополнительное сопротивление движению, малых газовых потерь на входе и, следовательно, невысокой пусковой нагрузки, а также протяженного во времени процесса сжатия спиральные насосы имеют относительно малое энергопотребление.

Недостатки спиральных вакуумных насосов

Основными недостатками СПВН являются сложность изготовления спиралей и высокая стоимость их производства. Еще один недостаток – достаточно жесткие требования к чистоте откачиваемого газа, поскольку зазоры между спиральями очень малы, и попадание частиц с размерами более величины зазора в условиях отсутствия смазки может привести к заклиниванию насоса. В случае вертикального расположения спиралей требования к чистоте откачиваемой среды могут быть снижены.

Один из главных недостатков СПВН – невысокая быстрота действия (до 10 л/с), что объясняется малыми частотами вращения и сложностью увеличения геометрических размеров спиралей.

Диапазон быстрот действия существующих насосов составляет 1,3–9,7 л/с при рабочей частоте вращения 1500 об/мин. Предельное остаточное давление находится в интервале от 1 до 50 Па. Спиральные насосы продолжительное время могут стабильно работать

на любых входных давлениях, от остаточного до атмосферного. Шумовые характеристики, как правило, не превышают 60 дБ.

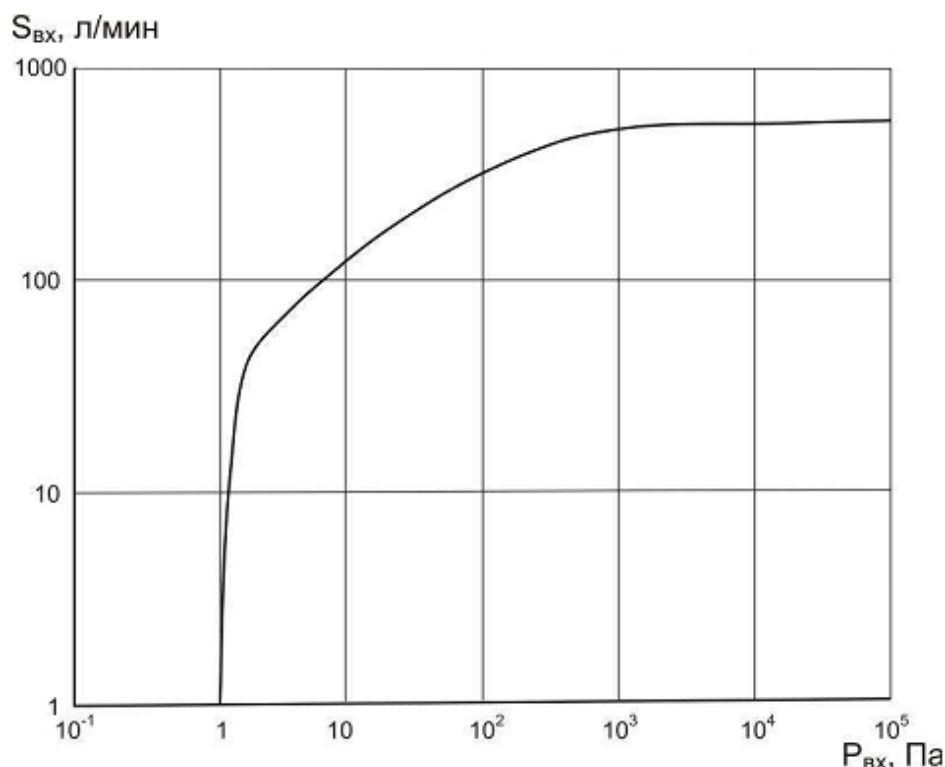


Рис. 32. Паспортная характеристика насоса DVS-321 фирмы «Ulvac»

Спиральные вакуумные насосы, как надежное и полностью герметичное средство откачки, используются в наиболее ответственных производствах с применением вакуума и оборудовании, критичных к наличию углеводородов: полупроводниковая и пищевая промышленность, масс-спектро스코пия, сканирующие электронные микроскопы, медицинские приборы и т. д.

Спиральные насосы также используются в качестве форвакуумных и насосов предварительной откачки для безмаслянных высоко- и сверхвысоковакуумных насосов (геттерных, турбомолекулярных) и в системах регенерации криогенных насосов.

На рис. 32 представлена паспортная характеристика спирального вакуумного насоса DVS-321 производства фирмы «Ulvac» — одного из серийно выпускаемых спиральных вакуумных насосов, а на рис. 33 — внешний вид насоса «Dry Run II» фирмы «ILMVAC».



Рис. 33. Внешний вид спирального насоса «Dry Run II» фирмы «ILMVAC»

3.8. Вымораживающие ловушки и хладагенты

Удаление из вакуумной системы паров жидкостей, масла, ртути и т.д., присутствующих в процессе откачки, обычно достигается путем использования вымораживающих ловушек, рис. 34.

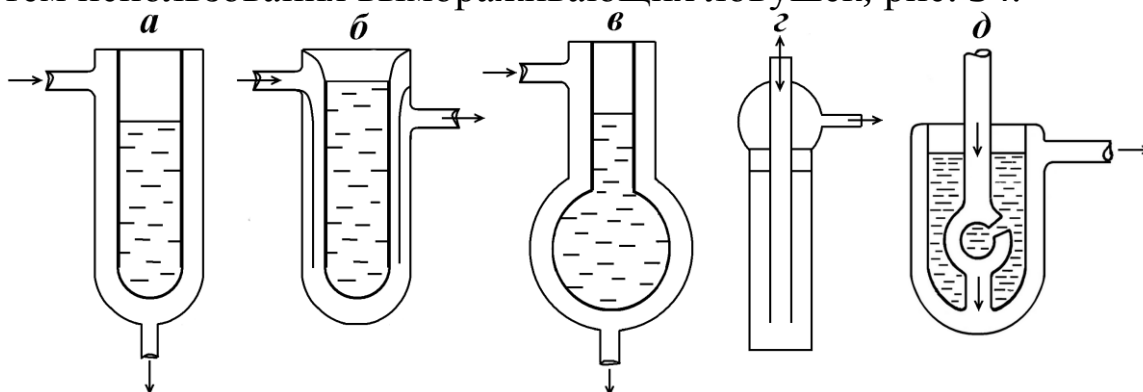


Рис. 34. Вымораживающие ловушки: *а* - цилиндрическая ловушка с прямым ходом; *б* - цилиндрическая ловушка с обратным ходом; *в* - ловушка шаровой формы; *г* - ловушка с внешним охлаждением (например, погружением в сосуд Дьюара с жидким азотом); *д* - высоковакуумная стеклянная ловушка

Из большого их разнообразия (механические, охлаждаемые, охлаждаемые с адсорбентом и т.п.) рассмотрим действие охлаждаемых ловушек, получившие наиболее широкое применение.

Действие охлаждаемых ловушек основано на конденсации на их стенках, охлаждаемых специальными веществами, паров жидкостей. Температура стенок ловушек при охлаждении жидким

азотом или водородом понижается до -196 и -258 °С соответственно. При этом упругость паров в вакуумной системе понижается. Процесс удаления паров жидкостей методом конденсации называют вымораживанием, поэтому охлаждаемые ловушки называют часто вымораживающими.

К числу основных веществ, используемых для охлаждения вымораживающих ловушек, относятся твердая двуокись углерода (сухой лед) и жидкий азот. В отдельных случаях применяют и другие охладители, перечень которых и их основные характеристики приведены в табл. 4.

Корпусы охлаждаемых ловушек изготавливаются обычно из стекла или металла. При выборе конструкции ловушек следует учитывать сопротивление, которое ловушки вносят в систему вакуумных трубопроводов.

Ловушка *б* (цилиндрическая, с обратным ходом) имеет большее сопротивление откачиваемым газам, чем ловушка *а* (цилиндрическая обыкновенная). Однако конденсационные свойства ловушки *б* лучше из-за хорошо развитой охлаждаемой поверхности и значительно большего пути соприкосновения с паром испаряющегося хладагента.

*Таблица 4. Некоторые вещества и их свойства, используемые в качестве хладагентов (охладителей).

Охладитель	Температура охладителя, °С	Давление насыщенного пара, Па		
		вода	ртуть	углекислота
Лед	0	613	8	—
Поваренная соль со льдом	-18	106,6	$4 \cdot 10^{-3}$	—
Хлористый кальций со льдом	-48	5,3	$5,3 \cdot 10^{-5}$	—
Смесь твердой двуокиси углерода с ацетоном	-78	$6,66 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	893110
Жидкий азот	-196	$1,3 \cdot 10^{-19}$	$1,3 \cdot 10^{-30}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
Жидкий водород	-258	$1,3 \cdot 10^{-20}$	$1,3 \cdot 10^{-30}$	—
Жидкий гелий	-269			

* Давление насыщенных паров масел, применяемых в пароструйных, насосах, снижается при использовании ловушек с жидким азотом примерно на один порядок.

Достоинство ловушки в (шаровой формы) в том, что в результате большого внутреннего объема в нее реже приходится доливать

жидкий азот, что существенно при длительных режимах откачки.

Однако при очень длительных режимах работы вакуумных насосов целесообразно применять ловушку δ (с внешним охлаждением), которая сама погружается в сосуд Дьюара, заполненный также жидким азотом.

В зависимости от времени откачки выбирают сосуд Дьюара того или иного размера. Этот тип ловушек выгодно отличается еще и тем, что вымораживающее действие можно легко прекратить путем снятия сосуда Дьюара, в то время как в других ловушках для этого следует выдувать жидкий азот, погружая в него резиновую трубку и пропуская через нее воздух. Эта операция бывает необходима, например, перед напайкой новой партии ламп на вакуумную установку.

На рис. 34 δ показан конструктивный вариант высоковакуумной стеклянной ловушки δ , особенностью которой является то, что обе стенки внутреннего трубопровода, через который проходит откачиваемый газ, охлаждаются жидким азотом. Это затрудняет проникновение в прибор паров жидкостей из пароструйного насоса, повышает эффективность ловушки и скорость достижения предельного вакуума.

Процесс удаления паров жидкостей методом конденсации называют вымораживанием, поэтому охлаждаемые ловушки также называют вымораживающими.

4. Лабораторные работы

4.1. Методические указания по подготовке, выполнению и защите лабораторных работ

Лабораторные работы по получению и измерению вакуума рекомендуется проводить после изучения теоретического материала по настоящему пособию и другой рекомендованной литературы. За несколько дней до начала лабораторных работ студентам следует сообщить график их проведения, который они записывают в рабочую тетрадь.

При подготовке к конкретной лабораторной работе студенты должны ознакомиться с ее содержанием по настоящему пособию, повторить соответствующий материал по учебникам, рекомендованным преподавателем, обязательно изучить правила техники безопасности и строго выполнять их, особенно при работе на установ-

ках с использованием высокого напряжения!

Студенты должны выполнять следующие правила.

1. Входить в лабораторию только с преподавателем.
2. Занимать рабочие места в соответствии с графиком выполнения лабораторных работ.
3. Не уходить с рабочего места без разрешения преподавателя.
4. Записывать в рабочую тетрадь план выполнения работ, перечень необходимых приборов и оборудования, расчетные формулы, электрические схемы и таблицы с результатами измерений.
5. После получения задания еще раз внимательно ознакомиться с работой, повторить теоретический материал к заданию.
6. Перед началом работы проверить исправность заземляющего провода и наличие ограждения частей, находящихся под высоким напряжением.
7. Не включать электрические установки без разрешения преподавателя.
8. После подачи высокого напряжения не касаться проводов, даже если они изолированы.
9. Получив разрешение от преподавателя на включение вакуумной установки, студент, включающий напряжение, должен предупредить работающих рядом словом «Включаю».
10. По окончании измерений все регулирующие устройства, в том числе автотрансформаторы, должны быть приведены в исходное положение (нулевое), блок-контакты должны быть разомкнуты.
11. Окончив работу, следует представить отчет преподавателю, привести в порядок рабочее место и с разрешения преподавателя уйти из лаборатории.

Отчет по работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующие данные: наименование учебного заведения; название работы и ее номер; фамилию студента и номер группы; краткое описание установки, используемой в работе, ее электрической схемы; таблицы с результатами измерений и вычислений; условия измерения (температура, относительная влажность, продолжительность измерений).

Перед началом выполнения очередной работы студенты должны сдать преподавателю для проверки отчет о предыдущей лабораторной работе.

4.2. Получение и измерение низкого, среднего, высокого и сверхвысокого вакуума

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Ознакомление с основными методами и техникой получения низкого, среднего, высокого и сверхвысокого вакуума

ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:

Трехступенчатый вакуумный откачной пост на базе механического ротационного (2НВР-5ДМ), диффузионного (ЦВЛ-100) и сверхвысоковакуумного (НМД-0,025) насосов; манометрические датчики для измерения низкого (ПМТ-2), высокого (ПМИ-2) и сверхвысокого (ИМ-12) вакуума с измерительными блоками ВИТ-2А и ВИ-14, сосуды Дьюара с жидким азотом, отградуированные дифференциальные термпары и термосы со льдом и водой для поддержания постоянной температуры одного из спаев термпары при 0 °С и другая вакуумная арматура.

На всех этапах выполнения лабораторных работ по получению вакуума (от низкого до сверхвысокого) требуется контроль степени разрежения в вакуумной откачной установке в зависимости от времени, вплоть до достижения предельного для каждого из типов вакуумного насосов. Поэтому вначале необходимо усвоить и отчитаться перед преподавателем по содержанию теоретической части данного пособия и получить допуск к выполнению описанных ниже лабораторных работ, предназначенных для практического знакомства с основными методами и техникой получения вакуума, а также приобретения навыков по самостоятельной эксплуатации вакуумных установок.

1. Упражнение 1. Получение и измерение вакуума до 10^{-1} Па.

а) Ознакомиться с устройством и принципом работы теплоэлектрического манометрического датчика, а также с инструкцией по его включению вместе с показывающим блоком-преобразователем ВИТ-2А (термпарная часть блока), Прил. 3.

б) Убедившись, что закрыт вентиль для напуска воздуха, включить механический форвакуумный насос. Через 5-10 мин. открыть вентиль входного патрубка пароструйного насоса и откачать всю установку 30 мин.

Внимание: При первом запуске, а также после продолжительных

перерывов в работе или после заправки свежим маслом конечный вакуум достигается насосом не сразу, а по истечении некоторого времени, необходимого для обезгаживания насоса.

в) Переключить тумблер с надписью «рабочий ток-измерение» в положение «рабочий ток» и, регулируя соответствующей ручкой на панели прибора ВИТ-2, установить рабочий ток манометрического датчика ПМТ-2. При этом необходимо помнить, что манометр обладает заметной инерционностью и рабочий ток устанавливается медленно, в течение минуты. Величина рабочего тока манометрического датчика указывается на табличке, прикрепленной к панели вакуумметра ВИТ-2. «Рабочий ток» определяется заранее, непосредственно при вскрытии манометра и его напайкой на вакуумную установку. Обычно значение рабочего тока лежит в пределах $100 \div 130 \text{ мА}$.

г) Измерить вакуум в системе с помощью манометрического датчика ПМТ-2 и измерительного блока ВИТ-2П. Для этого:

1) Переключить тумблер «рабочий ток-измерение» в положение «измерение». Дождавшись установки и успокоения стрелки-указателя на шкале «милливольты», (верхняя шкала левого блока панели прибора ВИТ-2), снять отсчет (в мВ) и записать показание прибора и зафиксировать время снятия отсчета.

2) Используя градуировочную кривую манометра ПМТ-2 (рис. 7), определить вакуум в установке в данный момент времени и записать в лабораторную тетрадь. В дальнейшем необходимо непрерывно контролировать степень разрежения по мере его улучшения в вакуумной установке, измеряя и записывая показания манометра и время, через каждые 15 мин. Записи будут востребованы в конце работы для построения графиков и расчетов.

2. Упражнение 2. Получение и измерение высокого вакуума (до 10^{-4} Па).

а) После достижения разрежения $\sim 1 \text{ Па}$ в вакуумной установке и откачиваемом объеме, включить диффузионный (пароструйный) насос. Для этого:

- подать воду в водоохлаждающую систему на корпусе паромасляного насоса ЦВЛ-100;
- убедиться, что расход (напор) воды нормален (около 10 л/мин), шланги для подачи охлаждающей воды нигде не протекают, а отработанная вода сливается обратно в водопроводную сеть;

б) с помощью ЛАТРа (лабораторного автотрансформатора) подать напряжение 220 В в цепь подогревателя (печи) вакуумного насоса ЦВЛ-100.

ВНИМАНИЕ:

- Максимальная электрическая мощность, на которую рассчитана печь – подогревателя насоса ЦВЛ-100, не должна превышать 450 Вт !

- После подачи электрической мощности на подогреватель (печь) насоса и начала прогрева рабочей жидкости (вакуумного масла) и деталей диффузионного насоса, обычно вакуум на некоторое время может заметно ухудшиться из-за интенсивного газовыделения в самой системе, но через 15-20 минут вакуум вновь должен восстановиться и улучшаться.

в) Через 45 мин после включения вакуумной установки, используя ионизационный датчик ПМИ-2, согласно Инструкции по его эксплуатации, измерить вакуум.

г) После достижения вакуума 10^{-3} Па необходимо начать термовакуумную обработку откачиваемого объема. Для этого:

д) Подать регулируемое напряжение (начиная со 100 В) от ЛАТРа на вход нагревателя термостата 5 (рис. 11) и в течение часа постепенно повышать его, пока температура в термостате не повысится до 450 °С.

е) Надев шерстяные рукавицы, через пластмассовую воронку, вставленную в горловину вымораживающей ловушки, осторожно и медленно залить жидкий азот, заполнив ловушку не более, чем на 80%.

ж) Выдержать при температуре 450 °С один час для полного завершения термовакуумной обработки и установления предельного вакуума.

з) Снять крышку термостата и быстро отпаять или отсоединить откачиваемый объем (например, измерительную ячейку).

Остановка и выключение вакуумной установки

Остановка вакуумной установки производится строго последовательно в следующем порядке:

а) Отключить термостат от энергопитания и через 15-20 минут перекрыть вакуумный вентиль, отделяющий от откачиваемый объем от вакуумной установки, т.е. отсекая его от вакуумной установки.

б) Отключить печь-подогреватель пароструйного насоса и дать

остыть до 50 °С. С целью ускорения данного процесса можно использовать следующий прием: снять нагревательную печь пароструйного насоса сразу после ее отключения от электрической сети и начать обдувать воздухом, используя вентилятор.

в) Перекрыть вакуумный вентиль между пароструйным и механическим форвакуумными насосами.

г) Перекрытием водяного крана прекратить подачу воды для охлаждения корпуса пароструйного насоса.

д) Выключить форвакуумный насос и напустить воздух в низковакуумный отсек вакуумной установки через специальный капиллярный натекабель.

е) Построить необходимые графики зависимости степени вакуума от времени ее достижения, скорости откачки и т.п. Составить отчет и отчитаться.

3. Упражнение 3. Получение и измерение сверхвысокого вакуума.

Приступая к выполнению данного упражнения, еще раз напоминаем, что выходное напряжение блока питания сверхвысоковакуумного насоса НМД-0,025, используемого при выполнении данной работы, достигает 7000 В, что опасно для жизни!

Требуется обязательное соблюдение правил техники безопасности при работе с напряжением свыше 1000 В !

1. Внимательно ознакомиться с инструкциями по эксплуатации вакуумметра ВИ-14, (с преобразователем – датчиком ИМ-12); блока питания БП-0,025 и сверхвысоковакуумного насоса НМД-0,025.

2. С помощью насосов предварительного разрежения, откачать вакуумную установку до давления около 10^{-1} Па, как это было описано выше (упр. 1).

3. Включить блок питания БП-0,025 вакуумного насоса НМД-0,025 в сеть 220 В. Нажать кнопку «Сеть – Вкл». При этом должна загореться сигнальная лампочка «Блок включен».

4. Измерить выходное напряжение блока БП-0,024, установив переключатель «Измерение» в положение «0...10 кV»

5. Для определения степени разрежения измерить ток нагрузки (который тем меньше, чем лучше вакуум) блока БП-0,025. Для этого переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» установить на необходимый пре-

дел. После включения вакуумного насоса НМД-0,025 вакуум начнет улучшаться (а рабочий ток, соответственно, уменьшаться). По достижении рабочего тока около 20 mV можно приступить к измерению вакуума с помощью вакуумметра ВИ-14. Для этого поставить переключатели и тумблеры в исходные положения:

а) «ИЗМЕРЕНИЕ – ОБЕЗГАЖИВАНИЕ» – в положение «ИЗМЕРЕНИЕ»;

б) «ШКАЛА – ПРИБОРА» – в положение «ЛИНЕЙНАЯ»;

в) «МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ» – в положение « $10^{-6}/K_2$ »;

г) «ИЗМЕРЕНИЕ - УСТАНОВКА НУЛЯ» – в положение «УСТАНОВКА НУЛЯ»;

д) «ИЗМЕРЕНИЕ – УСТАНОВКА ТОКА ЭМИССИИ» – в положение «УСТАНОВКА ТОКА ЭМИССИИ»;

7. Включить тумблер «СЕТЬ»;

8. Установить стрелку измерительного прибора ручкой «УСТАНОВКА ТОКА ЭМИССИИ» на отметку «5» линейной шкалы;

9. После 30 мин. прогрева установить тумблер «ИЗМЕРЕНИЕ – УСТАНОВКА ТОКА ЭМИССИИ» в положение «ИЗМЕРЕНИЕ»;

10. С помощью ручки «УСТАНОВКА НУЛЯ» установить нуль на стрелочном приборе;

11. Установить переключатель «МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ» в положение, удобное для отсчета показания стрелочного прибора;

12. Установить тумблер «ИЗМЕРЕНИЕ - УСТАНОВКА НУЛЯ» в положение «ИЗМЕРЕНИЕ». Сделать отсчет ионного тока преобразователя по линейной шкале стрелочного прибора, умножив его на соответствующий множитель шкалы;

13. Через 2 часа после начала работы вакуумного насоса и достижения предельно высокого вакуума вычислить величину давления (степень вакуума) по формуле $P = \frac{I}{2,5 \cdot 10^{-2}}$, где P – давление, мм. рт.

ст., I – сила тока, А;

14. Выключить вакуумметр ВИ-14 и блок питания насоса БП-0,25;

15. Выключить вакуумную установку в следующей последовательности: сверхвысоковакуумный насос НМД-0,025, диффузионный насос и, после его охлаждения, - форвакуумный насос, придерживаясь при этом каждый раз инструкции по эксплуатации каждого из насосов (см. Прил. 4);

16. Составить отчет о выполнении упражнения и работы в целом.

Контрольные вопросы:

1. Определение вакуума.
2. Единицы измерения вакуума и связь между ними.
3. Определение понятий «пар» и «газ».
4. Три основных режима течения газа.
5. Зависимость сопротивления вакуумного трубопровода от его диаметра и длины при различных режимах течения газа.
6. При каком отношении средней длины свободного пробега частиц $\bar{\lambda}$ к характерному линейному размеру откачиваемого объема d , т.е. $\bar{\lambda}/d$, имеет место:
7. - низкий вакуум (до 10 Па);
8. - средний вакуум (10^{-1} - 10^{-2} Па);
9. - высокий (10^{-2} ÷ 10^{-5} Па);
10. - сверхвысокий вакуум (от 10^{-6} Па и выше);
11. Как зависит пропускная способность вакуумного трубопровода от его диаметра и давления газа в нем при молекулярном режиме течения газа?
12. Как зависит пропускная способность вакуумного трубопровода от его диаметра и давления газа в нем при молекулярно-вязкостном режиме течения газа?
13. Основное уравнение вакуумной техники.
14. Время (в сек), требуемое для образования одного монослоя при экспозиции поверхности в вакууме а) 10^{-9} Па; б) 10^{-10} мм. рт. ст.; в) 10^{-2} Па.
15. Перечислите другие названия механических вращательных насосов.
16. Устройство и принцип работы вакуумных насосов первого типа.
17. Устройство и принцип работы вакуумных насосов второго типа.
18. Устройство и принцип работы вакуумных насосов третьего типа.
19. Какое предельное разрежение можно получить с помощью.
20. При каком противодавлении возможна работа форвакуумных вращательных механических насосов?
21. Схема устройства и принцип работы паромасляных насосов.
22. Перечислите другие названия паромасляных насосов.
23. Назовите условия, при которых могут работать пароструйные насосы (в отличие от ротационных механических насосов).

24. Предельное разрежение, которое можно получить с помощью пароструйных насосов.
25. При каком противодавлении возможна работа пароструйных насосов?
26. Какие марки вакуумных масел применяются в диффузионных насосах?
27. На что следует обращать внимание в водяном охлаждении диффузионных насосов?
28. Как изменяются характеристики диффузионных насосов при изменении мощности подогрева кипятильника?
29. Какие процессы происходят в высоковакуумном насосе непосредственно после включения нагревателя?
30. Чем определяется выпускное давление паромасляного насоса и какова роль этого параметра?
31. Предельное разрежение, которое можно получить с помощью магниторазрядных пароструйных насосов.
32. Устройство и принцип работы магниторазрядных насосов.
33. При каком противодавлении возможна работа магниторазрядных насосов?
34. Какие меры предосторожности необходимо применять при работе с магниторазрядными насосами?
35. Устройство и принцип работы геттерно-ионных насосов.
36. При каком противодавлении возможна работа геттерно-ионных насосов?
37. Какие вещества применяются в качестве поглотителей в сорбционных насосах?
38. Устройство и принцип работы турбомолекулярных насосов.
39. Предельное разрежение, которое можно получить с помощью геттерно-ионных насосов.
40. При каком противодавлении возможна работа геттерно-ионных насосов?
41. Для чего необходим предварительный прогрев насосов?
42. Устройство и принцип работы криогенных насосов.
43. Предельное разрежение, которое можно получить с помощью криогенных насосов.
44. Основные хладагенты и их термические свойства, используемые в криогенных насосах.
45. Основные типы манометров для измерения вакуума.
46. U-образные манометры, их назначение и типы.

47. Диапазон измерения вакуума U-образными манометрами.
48. Компрессионные манометры Мак-Леода: устройство и работа.
49. Диапазон измерения вакуума компрессионными манометрами Мак-Леода.
50. Конструкция и принцип работы термopарного манометра.
51. Физические факторы, ограничивающие пределы измерения вакуума термopарным манометром ПМТ-2 со стороны низких и высоких разрежений.
52. Электрическая схема включения термopарного манометра.
53. Конструкция и принцип действия ионизационного манометра.
54. Электрическая схема включения ионизационного манометра.
55. С чем связано ограничение пределов измерения вакуума ионизационным манометром ПМИ-2?
56. Манометрический датчик ИМ-12 для измерения сверхвысокого вакуума с блоком ВИ-14: особенности конструкции и принципа работы.
57. Физические факторы, ограничивающие пределы измерения вакуума манометром ИМ-12 со стороны низких и высоких разрежений.
58. Для чего применяются вымораживающие ловушки?
59. Какие типы вымораживающих ловушек Вам известны?
60. Сосуды Дьюара: устройство и принцип работы.
61. Как оценивается степень качества сосудов Дьюара?
62. Техника безопасности при пользовании сосудов Дьюара.
63. Экипировка студента при переливаниях жидкого азота из сосуда Дьюара в стеклянные ловушки вакуумных установок.
64. Изменяется ли давление насыщенных паров масел, применяемых в пароструйных насосах, при использовании ловушек с жидким азотом?
65. Способы поиска течей в вакуумных установках.
66. Устройство, принцип работы и применение искрового течеискателя И043.009.

Основная литература

1. Розанов Л. Н. Вакуумная техника: Учебник для вузов. 2-е изд. - М.: Высшая школа. 1990. - 320 с.
2. Кеменов В.Н., Нестеров С.Б. Вакуумная техника и технология. - М.: Издательство МЭИ, 2002. - 84 с.
3. Саксаганский Г.Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. - М.: Атомиздат, 1980. - 216 с.
4. Хамеев В.М. Термодинамические процессы и параметрические характеристики вакуумных насосов. Монография. - Новосибирск: Наука, 1986. - 74 с.
5. Глазков А.А., Милованова Р.А. Учебная лаборатория вакуумной техники. - М.: Атомиздат, 1971. - 278 с.
6. Королев Б.И., Кузнецов В.И., Пипко А.И., Плисковский В.Я. Основы вакуумной техники. - М.: Энергия, 1975. - 416 с.
7. Фролов Е.С. Вакуумная техника. М.: Машиностроение, 1992. - 480 с.
8. Саксаганский Г.Л. Электрофизические вакуумные насосы Научное издание. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 280 с.
9. Фролов Е.С., Автономова И.В., Васильев В.И., Никулин Н.К., Пластинин П.И. Механические вакуумные насосы. - М.: Машиностроение, 1989. - 288 с.
9. Лубенец В.Д., Васильев В.И., Автономова И.В., Беляев Л.А. Безмасляные механические форвакуумные насосы. - М.: Машиностроение, 1980. - 52 с.
10. Цейтлин А.Б. Пароструйные вакуумные насосы. - М.-Л.: Энергия. 1965. - 400 с.
11. Уэстон Дж. Ф. Техника сверхвысокого вакуума. Ultrahigh vacuum practice). (Пер. с англ.). - М.: Мир, 1988. - 366 с.
12. Тренделенбург Э. Сверхвысокий вакуум. (Перев. с нем.). - М.: Мир, 1966. - 286 с.
13. Саксаганский Г.Л. Испарительные геттерные и ионно-геттерные насосы. - М.: ЦИНТИнефтехиммаш, 1988. - 55 с.
14. Саксаганский Г.Л. Современные турбомолекулярные и электрофизические насосы. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1981. - 97 с.
15. Фролов Е.С. Турбомолекулярные вакуум-насосы. - М.: Машиностроение, 1980. - 119 с.
16. Вентура Г., Ризегари Л. Искусство криогеники. - Долгопрудный: Изд. ИНТЕЛЕКТ, 2011. - 336 с.
17. Буренин В.В., Дронов В.П., Воробьев Е.В. Конструкции насосов для криогенных жидкостей. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1981. - 45 с.

18. Бурмистров А.В., Саликеев С.И. Бесконтактные вакуумные насосы: учебное пособие / Федеральное агентство по образованию. Казан. гос. технол. ун-т. Казань: КГТУ, 2010. 101 с. ISBN 978-5-7882-0828-2

Дополнительная литература

19. Минайчев. В.Е. Вакуумные крионасосы. М.: Энергия, 1976. - 152 с.
20. Ворончев Т.А., Соболев В.Д. Физические основы электровакуумной техники. М.: Высшая школа, 1967. - 352 с.
21. Хэфэр Р. Криовакуумная техника: Основы и применения. (Kryo-vakuumtechnik, 1981) Пер. с нем. Грачева А.Б. и Калинина Н.В). - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.
22. Востров Г.А., Розанов Л.Н. Вакуумметры. Л.: Машиностроение, 1967. 235 с.
23. Гуляев М.А., Ерохин А.В. Измерение вакуума. М.: 1967. 148 с.
24. Дешман С. Научные основы вакуумной техники. - М.: Изд. Иностран. литературы, 1964. - 715 с.
25. Ланис В.А., Левина Л.Е. Техника вакуумных испытаний. - М.: Госэнергоиздат, 1963. - 264 с.
26. Левина Л.Е., Пименов В.В. Методы и аппаратура контроля герметичности вакуумного оборудования и изделий приборостроения. - М.: Машиностроение, 1985. - 72 с.
27. Вакуумное оборудование. Каталог. (Под редакцией Капустина Е.Н.) - Казань: Издательский центр «Арт-кафе». 2007. - 96 с.
28. Ларин М.П. Сверхвысоковакуумный гелиевый заливной криогенный насос повышенной производительности // Журнал технической физики. – 1998. – Т. 58. – Вып. 4. – С. 744-753.
29. Кеменов В.Н. Научно-исследовательский институт вакуумной техники им. С.А. Векшинского накануне 55-летия со дня основания // Сб. докл. 5-го Междунар. симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование» / Под ред. В.И. Лапшина и В.М. Шулаева. Харьков: 2002. С. 6.
30. Лазарев Б.Г. Истоки криовакуума // Труды Украинского вакуумного общества. Киев. 1995. Т.1. С. 20–27.
31. Журнал «Вакуумная техника». 2006-2012 г.г.
32. Физический энциклопедический словарь. (Гл. редактор А.М. Прохоров). - М.: Советская энциклопедия, 1983. - 928 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1, а.

Таблица 5. Марки вакуумных масел и рекомендации по их применению

Тип масла	В каких насосах используется	Молекулярная масса	Плотность кг/м ³	Давление пара при 20°C, Па (мм. рт. ст.)	Остаточное давление пароструйного насоса, Па (мм. рт. ст.)	Примечание
Минеральные: ВМ-1	Диффузионных	450	870	$5,3 \cdot 10^{-6} - 2,66 \cdot 10^{-7}$ ($4 \cdot 10^{-8} - 2 \cdot 10^{-9}$)	$2,7 \cdot 10^{-4}$ ($2 \cdot 10^{-6}$)	ГОСТ 5671-70
ВМ-2	То же	450	870	$5,3 \cdot 10^{-6} - 2,66 \cdot 10^{-7}$ ($4 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-9}$)	$\leq 4,6 \cdot 10^{-4}$ ($\leq 3,5 \cdot 10^{-6}$)	ГОСТ 5671-70
ВМ-3	Бустерных	-	850	$1,3 \cdot 10^{-2} - 1,3 \cdot 10^{-3}$ ($1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-5}$)	-	МРТУ 38-1
ВМ-4	Механических	-	-	$6,6 \cdot 10^{-4} - 1,3 \cdot 10^{-3}$ ($5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$)	-	ГОСТ 7903-56
ВМ-5	Диффузионных	450	870	$1,3 \cdot 10^{-6} - 1,3 \cdot 10^{-7}$ ($1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-9}$)	$1,3 \cdot 10^{-6}$ ($1 \cdot 10^{-8}$)	МРТУ 38-1
ВМ-6	Механических	-	-	$1,3 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-5}$ ($1 \cdot 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-7}$)	-	РТУ РСФСР № НП-12-61
ВМ-7	Диффузионных	-	-	$\leq 4 \cdot 10^{-9}$ ($\leq 3 \cdot 10^{-8}$)	$\leq 1,3 \cdot 10^{-4}$ ($\leq 1 \cdot 10^{-6}$)	ВТУ МЗ 17-62
Г	Бустерных	350	850	$6,6 \cdot 10^{-3} - 1,3 \cdot 10^{-4}$ ($5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$)	-	ГОСТ 9184-59
ТМ-1	Турбомолекулярных	-	-	$8,8 \cdot 10^{-3}$ ($6,6 \cdot 10^{-5}$)	-	ВТУ МЗ-11-62
Сложные эфиры: Продукт ОФ	Диффузионных	390	980	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$\leq 1,3 \cdot 10^{-4}$	ТУ 1732-48

Продукт ОС . .	То же	426	910	$(1 \cdot 10^{-7})$ $\leq 2,7 \cdot 10^{-6}$	$(\leq 1 \cdot 10^{-6})$ $\leq 1,3 \cdot 10^{-4}$	ТУ 1732-48
5Ф4Э	То же	446	1200	$(\leq 2 \cdot 10^{-8})$ $1,3 \cdot 10^{-9}$ (10^{-11})	$(\leq 1 \cdot 10^{-6})$ $\leq 9,3 \cdot 10^{-7}$ $(\leq 7 \cdot 10^{-9})$	ТУ 609-447-70
Кремнийоргани- ческие: ПЭС-В-1 (ВКЖ- 94А)	То же	700	970	$\leq 6,6 \cdot 10^{-6}$ $(\leq 5 \cdot 10^{-8})$	$2,7 \cdot 10^{-4}$ $(2 \cdot 10^{-6})$	ГОСТ 16480- 70
ПЭС-В-2 (ВКЖ- 94Б)	То же	700	970	$1,3 \cdot 10^{-6} - 1,3 \cdot 10^{-4}$ $(1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-6})$	$4 \cdot 10^{-4} - 1,3 \cdot 10^{-3}$ $(3 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5})$	ГОСТ 16480- 70
ПФМС-1	Бустерных	700	1000	$1,3 \cdot 10^{-3} - 9 \cdot 10^{-3}$ $(1 \cdot 10^{-5} - 7 \cdot 10^{-5})$	-	ТУ ГХК ЕУ- 246-62
ПФМС-2/5л	Диффузионных	700	1050- 1070	$6,6 \cdot 10^{-7} - 9 \cdot 10^{-5}$ $(5 \cdot 10^{-9} - 7 \cdot 10^{-7})$	$2,7 \cdot 10^{-4}$ $(2 \cdot 10^{-6})$	МРТУ 6-02- 414-67
ФМ-1	То же	546,9	1096	$1,3 \cdot 10^{-8}$ (10^{-10})	$1,3 \cdot 10^{-7} -$ $1,0 \cdot 10^{-6}$ $((1-8) \cdot 10^{-9})$	ТУП-134-69

ПРИЛОЖЕНИЕ 1, б. Требования к вакуумным маслам и некоторые рекомендации по их применению

Основные требования к рабочей жидкости для паромасляных насосов:

1. - низкая упругость пара при комнатной температуре;
2. - высокая термическая стабильность при рабочих температурах (отсутствие разложения при длительном нагреве);
3. - высокая термоокислительная стабильность (стойкость к окислению при соприкосновении в нагретом виде с атмосферным воздухом);
4. - низкая поглощательная способность по отношению к газам.

Эти требования хорошо удовлетворяются кремнийорганическим маслом, называемым силиконовым. Силиконовое масло – высокомолекулярная синтетическая жидкость, в состав которой входят углеводороды и окись кремния. Она отличается высокой термической и термоокислительной стабильностью. Более того, при нормальной рабочей температуре насоса и атмосферном давлении воздуха это масло сохраняет свои свойства в течение сравнительно длительного времени, из-за чего оно широко используется.

Наибольшее распространение получила так называемая вакуумная кремнийорганическая жидкость ВКЖ-94А. Упругость пара при температуре 20 °С этой жидкости не превышает $6,665 \cdot 10^{-6}$ Па.

Последними новинками являются полифенилметилсилоксановые смеси марок ПФМС-1, ПФМС-2, ПФМС-2,5 и ПФМС-3, которые характеризуются еще более высокой термоокислительной стабильностью и применяются в паромасляных насосах специального назначения.

Силиконовое масло появилось относительно недавно, поэтому наряду с ним в паромасляных насосах применяют и другие рабочие жидкости. Это сложные эфиры и минеральные масла (продукты переработки нефти). К первой группе относят жидкости ОФ и ОС.

Октойли Ф и С – органические соединения синтетического происхождения, представляющие собой сложные эфиры фталиевой и себациновой кислот, имеющие низкую упругость пара, благодаря чему в насосах при соблюдении нормального режима работы может быть достигнут высокий вакуум без применения вымораживающих ловушек. Серьезными недостатками октойлей считают их низкую термическую и термоокислительную стабильность. При попадании

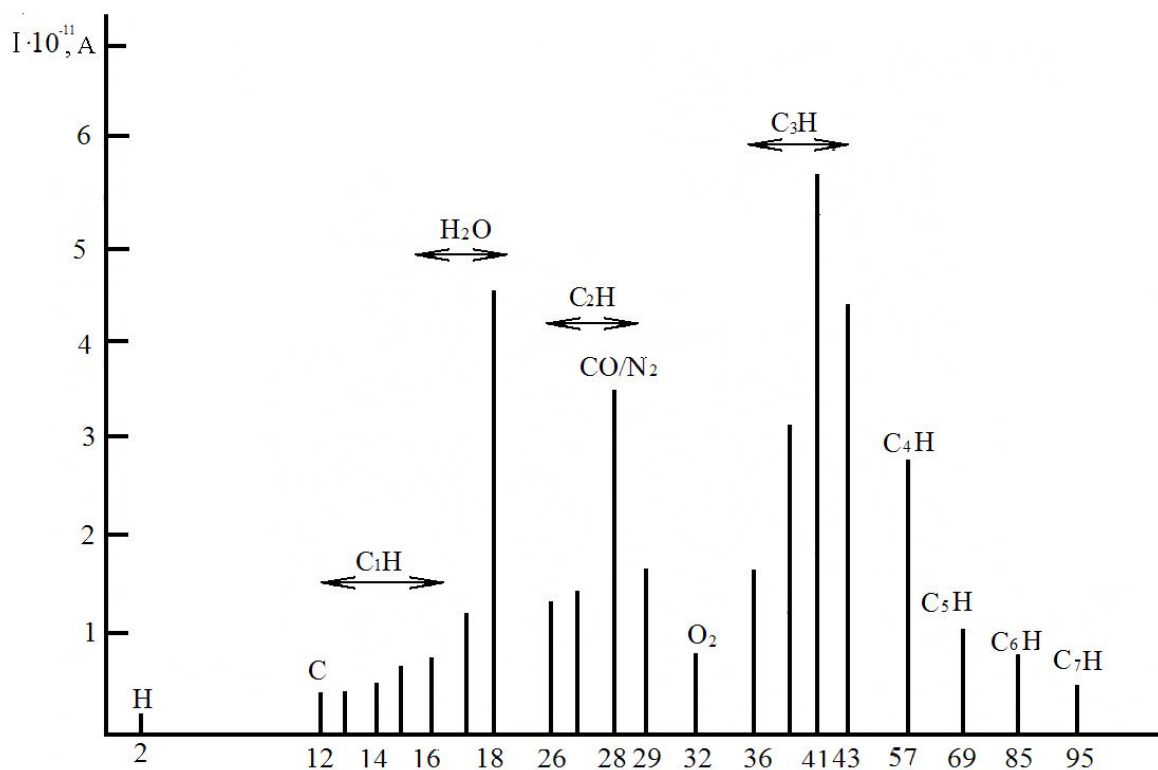
в насос атмосферного воздуха они сразу теряют свои свойства и становятся непригодными для дальнейшей работы.

Ко второй группе жидкостей относят минеральные масла ВМ-1, ВМ-2, ВМ-3, ВМ-4, ВМ-5, ВМ-6, которые получают разгонкой под вакуумом медицинского вазелинового масла, (температурные пределы дистилляции 180 - 220 °С). Они уступают по своим термо-окислительным свойствам силиконовым, но стоят значительно дешевле и поэтому широко используются в паромасляных насосах.

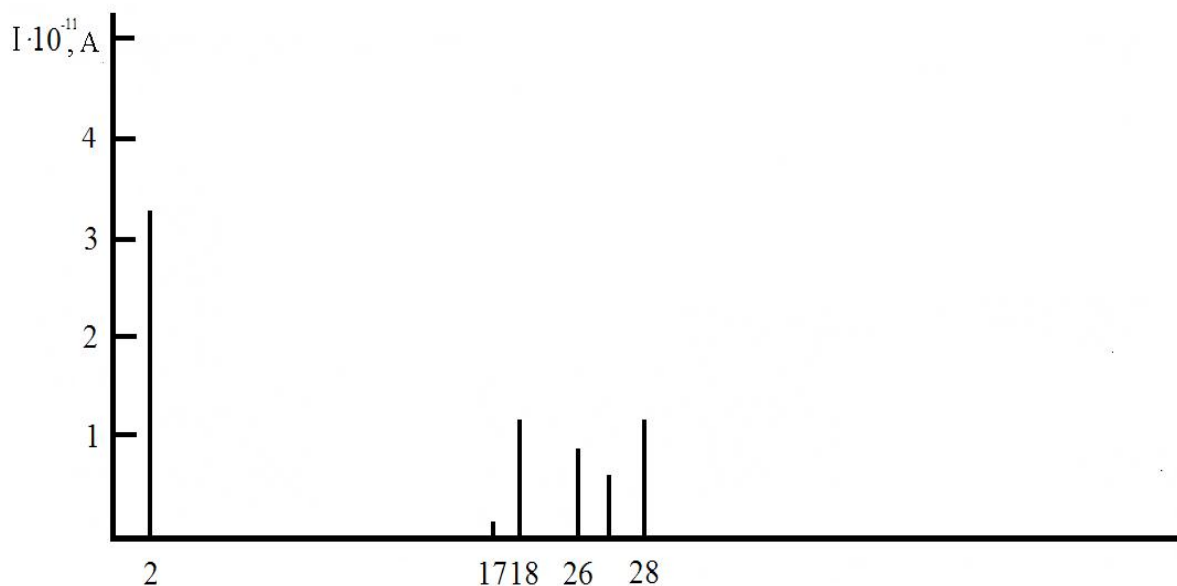
ПРИЛОЖЕНИЕ 1, в. Технические характеристики паромасляных насосов

Основные характеристики	ММ-40А	ЦВЛ-100С	ИО-76 016	Н-0,025-2	НВО-40М	НВД-0,25	НВДС-100	Н-160/700	Н-400/700
Диапазон рабочих давлений, Па	$5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-2}$	$10^{-4} - 10$	$10^{-3} - 5$	$10^{-3} - 7$	$10^{-4} - 4$	$10^{-4} - 3$	$10^{-4} - 3$
Быстрота откачки в рабочем диапазоне давлений, м ³ /с	25	100	500	0,01	0,04	0,12	0,24	0,64	5,60
Предельное остаточное давление, Па	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 3 \cdot 10^{-4}$	$\leq 7 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Наибольшее выпускное давление, Па	5	10	70-100	92	40	66	40	33	27
Мощность нагревателя, кВт	0,45	0,450	2,0	0,23	0,45	0,5	0,6	0,8	4
Расход воды на охлаждение насоса, дм ³ /с	0,014	0,014	0,06	-	-	0,02	0,02	0,02	0,06
Количество рабочей жидкости, дм ³	0,04	0,075	3,00	0,02	0,1	0,13	0,1	0,30	1,40
Диаметр выпускного патрубка, мм	-	-	-	40	62	100	100	160	400
Габаритные размеры (длина, ширина и высота), мм	205x116x455	265x130x465	320x220x540	-x-x-40	283x200x302	320x210x421	275x180x360	425x260x370	859x526x762
Масса, кг	6,9	6,9	14,0	-	8	14	8	16	80

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Спектры остаточных газов при откачке различными типами вакуумных насосов



a)



(б)

Рис. 35. Масс-спектрограмма остаточных газов: *a* – без наличия ионной ловушки (общее давление $1,5 \cdot 10^{-1}$ Па); *б* – с ионной ловушкой (общее давление 10^{-3} Па)

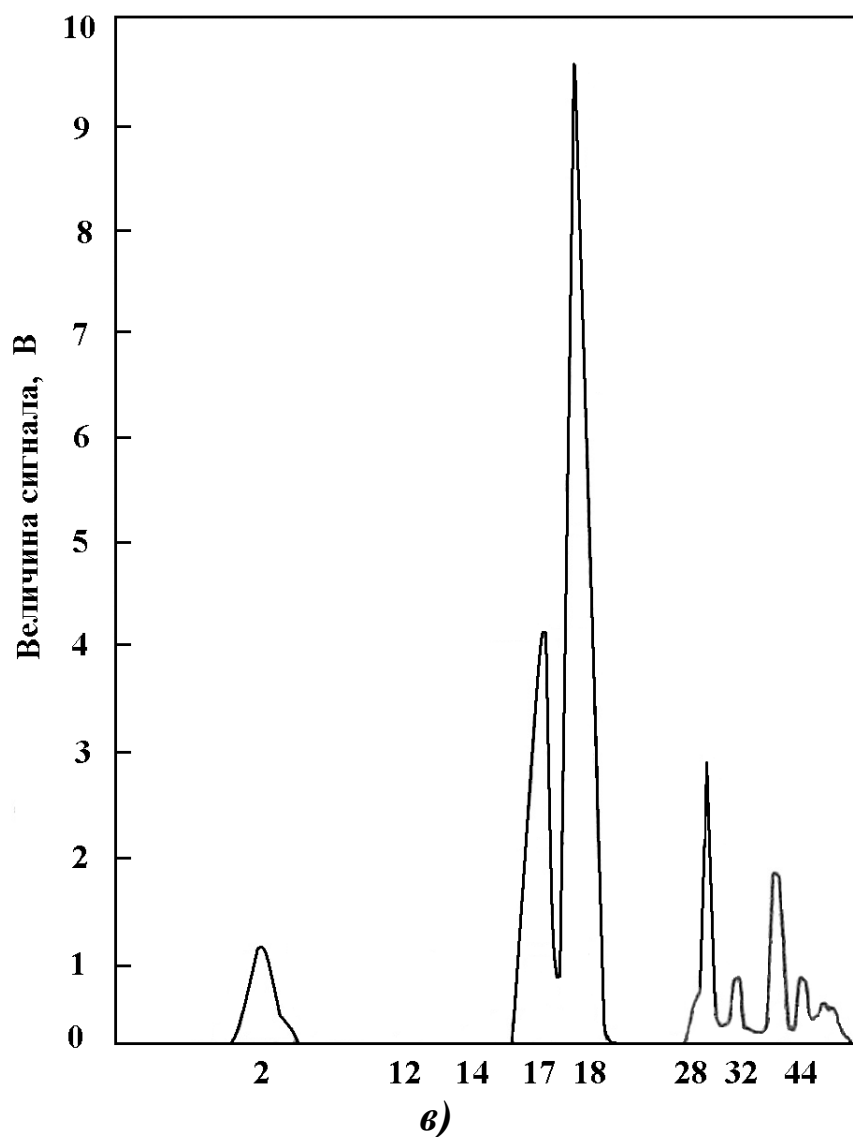


Рис. 36. Спектр масс остаточных газов вакуумной установки при откачке паромасляным насосом

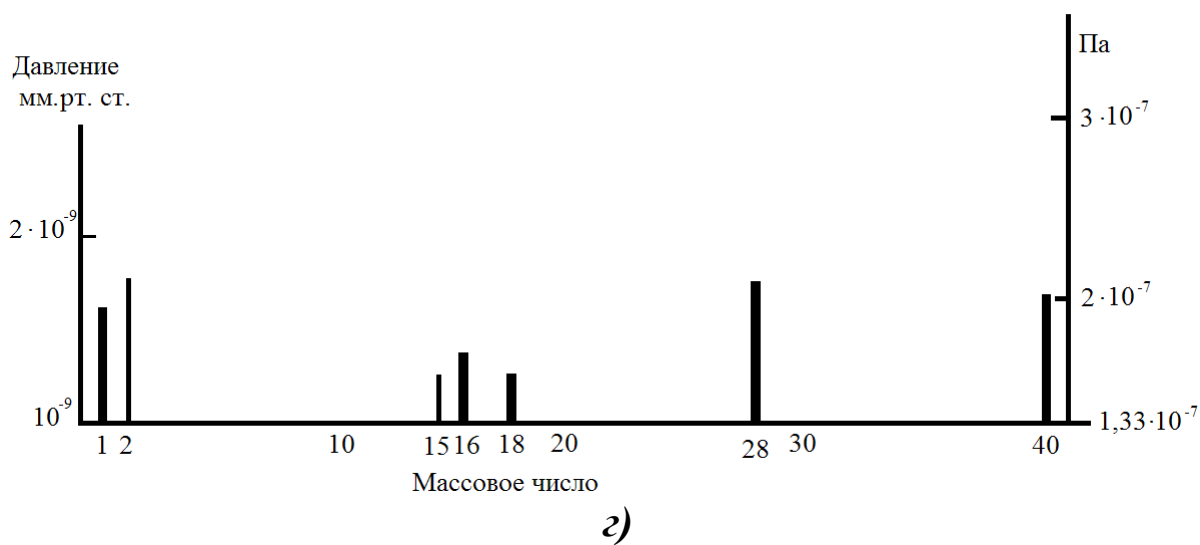


Рис. 37. Состав остаточных газов при получении вакуума геттерно-ионным насосом

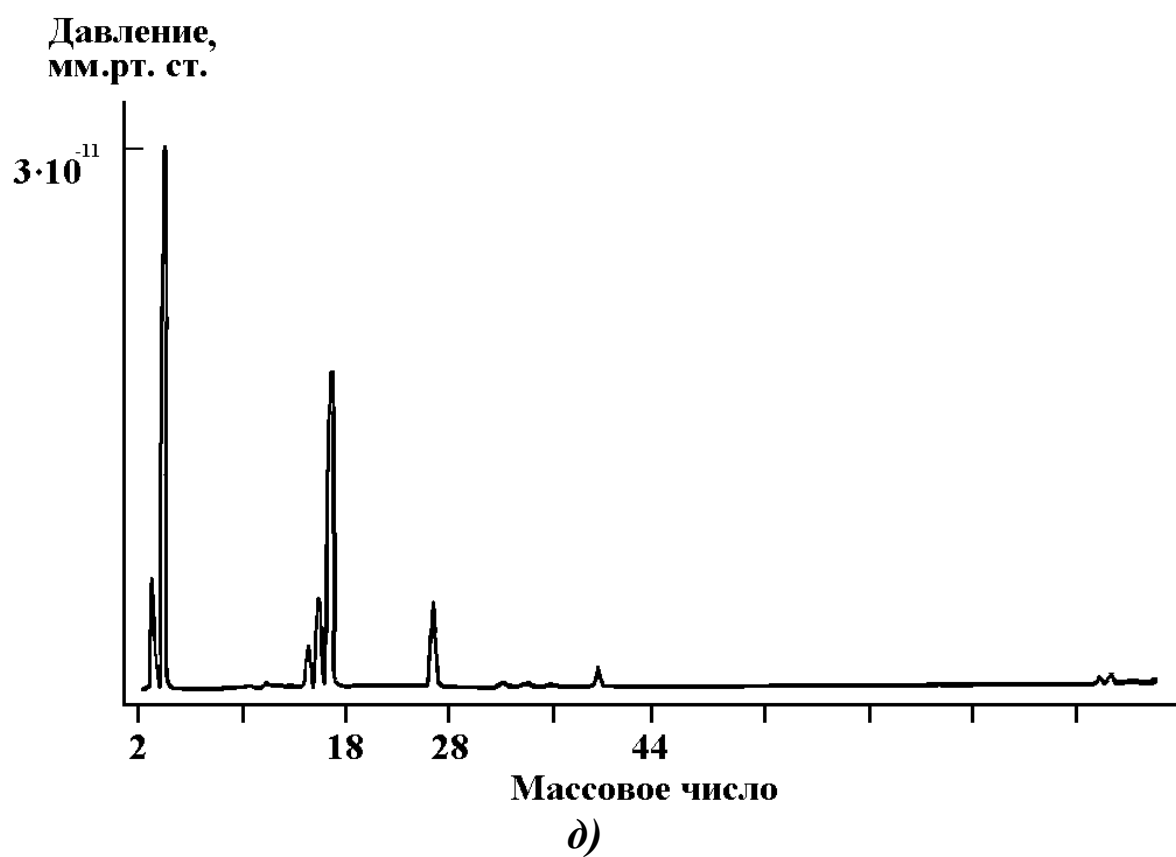


Рис. 38. Состав остаточных газов при получении вакуума турбомолекулярным насосом

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ – 2

Для измерения низкого и среднего вакуума (до 10^{-1} Па) используется левая (термопарная) половина панели блока вакуумметра ВИТ-2, рис. 39.

Измерение вакуума производится в следующей последовательности:

а) - После получения разрешения преподавателя включить форвакуумный насос вакуумной установки и произвести откачку системы в течение 10-15 минут;



Рис. 39. Вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ – 2

б) - Измерение вакуума всегда должно начинаться с установления точного значения рабочего тока манометрического датчика ПМТ-2, которое определяется заранее, еще при вскрытии датчика и его напайки на вакуумную установку. Величина «рабочего тока» указана на специальной табличке, прикрепленной к блоку ВИТ-2 на видном месте.

в) - Включить тумблеры «СЕТЬ» и «ВКЛ» термопарной части вакуумметра (при этом должна загореться индикаторная лампа

«СЕТЬ»); Прогреть прибор в течение 10 мин.

г) - **Установить «рабочий ток» манометрического датчика ПМТ-2.**

Для этого

- установить тумблер-переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» - «ТОК НАГРЕВАТЕЛЯ» в положение «ТОК НАГРЕВАТЕЛЯ» и ручкой-регулятором резистора «ТОК НАГРЕВАТЕЛЯ» установить требуемую величину рабочего тока стрелку, указанную на табличке;

д) - Для измерения степени вакуума переключить вверх тумблер «ИЗМЕРЕНИЕ» - «ТОК НАГРЕВАТЕЛЯ» в положение «ИЗМЕРЕНИЕ» и по верхней шкале измерительного прибора отсчитать э.д.с. в милливольтках;

е) - Используя градуировочную кривую (см. рис. 7), по величине найденного э.д.с. определить вакуум в откачной системе.

ж) - Откачку и измерение вакуума следует продолжать вплоть до достижения предельного для данного форвакуумного насоса давления.

з) - После завершения работы выключить измерительный блок вакуумметра ВИТ-2.

и) - Выключить форвакуумный механический насос и тут же напустить воздух (через капиллярный натекаТЕЛЬ) в откачной вакуумный пост;

к) - Обработать полученные зависимости вакуума от времени работы форвакуумного насоса, обобщить их и составить общий отчет.

Измерение высокого вакуума вакуумметром ВИТ – 2 с ионизационным манометрическим датчиком ПМИ-2

Внимательно изучить описание вакуумметра ВИТ-2, обращая теперь особое внимание на ионизационную (правую) часть панели блока вакуумметра, предназначенную для измерения высокого вакуума.

Включить высоковакуумную установку и получить вакуум не хуже

10^{-2} Па и приступить к измерению вакуума. Для этого:

а) - Проверить и установить в исходное нулевое положение все ручки органов управления прибором ВИТ-2, расположенные на правой части панели, а тумблер «СЕТЬ», «НАКАЛ» и «ВКЛ» - в нижнее положение;

б) - Включить тумблером «СЕТЬ» вакуумметр ВИТ-2 в сеть 220 В;

в) – Включить тумблер «РОД РАБОТЫ» в положение «ПРОГРЕВ» и выдержать 10-15 мин.;

г) – Переключить тумблер «РОД РАБОТЫ» в положение «ОБЕЗГАЗИВАНИЕ» и произвести обезгаживание датчика ПМИ-2 10-15 мин.;

д) – Установить тумблер «РОД РАБОТЫ» в положение «УСТАНОВКА ЭМИССИИ». При этом стрелка микроамперметра должна установиться около середины шкалы микроамперметра, т.е. отметки 50 мкА;

е) – Ручкой «УСТАНОВКА ЭМИССИИ» установить стрелку микроамперметра точно на отметке 50 мкА;

ж) – После зашкаливания вправо стрелки термопарного датчика ПМТ-2, т.е. достижения вакуума не хуже 10^{-2} Па, установить ручку «МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ» в положение «УСТАНОВКА НУЛЯ»;

з) - При этом стрелка микроамперметра должна установиться в левое крайнее положение шкалы, напротив цифры 0. Произвести точную установку стрелки микроамперметра на нуль шкалы производится вращением ручки регулирующего резистора, установленного напротив специального отверстия, проделанного на правой боковой стороне в корпусе прибора ВИТ - 2;

и) - Ручку «РОД РАБОТЫ» установить в положение «ИЗМЕРЕНИЕ». При хорошем вакууме (не хуже 10^{-2} Па) стрелка микроамперметра станет

«зашкаливаться» влево, за отметку 0 (нуль) шкалы.

- к) – Вращать по ходу стрелки часов переключатель-фиксатор «МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ» строго последовательно от исходного положения «УСТАНОВКА НУЛЯ» вправо до тех пор, пока стрелка микроамперметра не окажется в рабочем поле шкалы, т.е. где-то между 0 и 100 μA . Добившись этого, снять отчет по микроамперметру. Если, к примеру, он окажется равным 3 μA , то цифра 3 и будет коэффициентом – множителем перед степенью вакуума, обозначенного на шкале прибора в виде степени 10^m . Если, например $m=5$, то вакуум будет равен 3 10^{-5} Па.
- л) – Откачку и измерение вакуума следует продолжать вплоть до достижения предельного для данного паромасляного насоса давления.
- м) – После завершения работы выключить измерительный блок вакуумметра ВИТ-2.
- н) - Выключить насосы высокого (диффузионного) и предварительного (форвакуумного) вакуума и после их охлаждения напустить воздух (через капиллярный натекаТЕЛЬ) в вакуумный пост;
- о) – Обработать полученные зависимости вакуума от времени работы паромасляного насоса и составить отчет.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Ионизационный вакуумметр ВИ-14

Ионизационный вакуумметр ВИ-14 предназначен для измерения и индикации давления сухого воздуха или других газов в диапазоне от 10 до $1 \cdot 10^{-8}$ Па ($0,1 \cdot 10^{-10}$ мм. рт. ст.) в лабораторных и производственных условиях.

Нормальные условия эксплуатации:

- температура окружающего воздуха 20 ± 5 °С;
- относительная влажность 65 ± 15 % при температуре воздуха 20 ± 5 °С;
- атмосферное давление 100000 ± 4000 Па (750 мм. рт. ст. $\pm$ 30 мм. рт. ст.);
- напряжение питающей среды 220 В, частота 50 Гц.

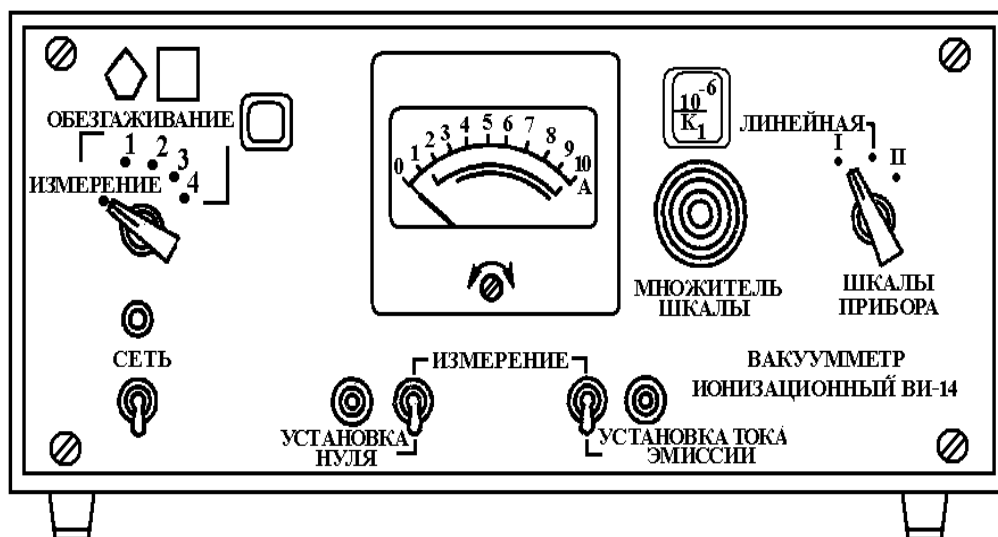


Рис. 40. Внешний вид измерительного блока вакуумметра ВИ-14

1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ вакуумметра ВИ-14

1.1. Диапазон измерения и индикации вакуумметром давлений воздуха от 10 до $1 \cdot 10^{-8}$ Па ($1 \cdot 10^{-1}$ – $1 \cdot 10^{-10}$ мм. рт. ст.).

При работе с манометрическим преобразователем ИМ-12 обеспечивается измерение давлений в диапазоне от $1 \cdot 10^{-3}$ до $7 \cdot 10^{-8}$ Па.

При работе с манометрическим преобразователем ПМИ-27 обеспечивается индикация давлений в диапазоне от 10 до $1 \cdot 10^{-8}$ Па.

1.2. Диапазон токов преобразователей, соответствующий измеряемому вакуумметром давлению, следующий:

для ИМ-12 – от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-11}$ А,
для ПМИ-27 – от $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-11}$ А.

Диапазон измеряемых токов разбит на десять поддиапазонов.

Значение тока каждого поддиапазона и соответствующий множитель шкалы даны в табл. 6.

Таблица 6. Значение тока каждого поддиапазона и соответствующий множитель шкалы

Значение тока, А	Множитель шкалы
K_2	
$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}
$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}
$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-7}$	10^{-7}
$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-8}$	10^{-8}
K_1	
$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}
$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-7}$	10^{-7}
$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-8}$	10^{-8}
$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-9}$	10^{-9}
$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-10}$	10^{-10}
$1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-11}$	10^{-11}

Токи преобразователей измеряются выходными прибором, который имеет линейную шкалу, отградуированную в амперах.

1.3. Для индикации давления в широких пределах входной прибор вакуумметра имеет обзорные логарифмические шкалы, отградуированные в единицах давлений; диапазон индуцируемых давлений составляет:

шкала « I » - от $10 - 10^{-2}$ Па ($1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-4}$ мм. рт. ст.),

шкала « II » - от $10^{-2} - 10^{-8}$ Па ($1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-10}$ мм. рт. ст.).

1.4. Наибольшая основная относительная погрешность измерения давления на линейных шкалах в нормальных условиях с манометрическим преобразователем ИМ-12 не превышает $\pm 55\%$.

1.5. Вакуумметр обеспечивает номинальные режимы работы манометрических преобразователей, приведенные в табл. 7.

Таблица 7. Электрические режимы работы манометрических преобразователей

Преобразователь	Ток эмиссии	Напряжение на электродах преобразователя, В		
		экран-корпус	катод-корпус	анод-корпус
ПМИ-27	150 мкА	300 ± 10	30 ± 3	-
ПМИ-27	5 мА	-	100 ± 5	300 ± 10
ИМ-12	5 мА	-	100 ± 5	300 ± 10

1.6. Электродная система манометрического преобразователя прогревается с помощью электронной бомбардировки. При этом напряжение на аноде преобразователя при токе эмиссии 50 мА - от 450 до 500 В, а при токе эмиссии 100 мА - от 400 до 450 В.

1.7. Изменение тока эмиссии (табл. 7) не превышает $\pm 3 \%$ при изменении напряжения питающей сети на плюс 10 % и минус 15 % от номинального значения 220 В. '

Ток эмиссии измеряется выходным прибором вакуумметра.

1.8. Уход нуля на самой чувствительной шкале прибора после предварительного прогрева в течение 30 мин не превышает $\pm 3 \%$ от верхнего предела шкалы - при изменении напряжения питающей сети на $\pm 10 \%$ от номинального значения 220 В;

1.9. Вакуумметр имеет разъем для подключения записывающего потенциометра.

1.10. Питание вакуумметра осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В частотой 50 Гц.

1.11. Вакуумметр допускает непрерывную работу в нормальных условиях в течение 8 ч.

2. УСТРОЙСТВО, РАБОТА ИОНИЗАЦИОННОГО ВАКУУММЕТРА ВИ-14

УКАЗАНИЯ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ:

При эксплуатации вакуумметра необходимо помнить, что в режиме обезгаживания на электроды манометрического преобразователя подается напряжение 450 В. Не рекомендуется снимать разъем с манометрического преобразователя при включенном в питающую сеть измерительном блоке.

При работе с вакуумметром измерительный блок должен иметь надежное электрическое соединение с заземляющей шиной.

Во избежание электрического удара и других травм запрещается работа с прибором со снятыми обшивками.

Принцип действия вакуумметра ВИ-14

При измерении давления газа вакуумметром ВИ-14 с помощью ионизационного манометрического преобразователя используется зависимость ионного тока от давления при условии постоянства напряжений питания преобразователя и тока эмиссии катода. Измерив ионный ток манометрического преобразователя, можно

определить давление газа в вакуумированной системе.

Ионный ток манометрического преобразователя проходит по входным резисторам или логарифмирующему диоду электрометрического каскада, создавая на них падение напряжения, которое усиливается усилителем постоянного тока. К выходу усилителя постоянного тока подключен стрелочный индикатор.

Питание манометрического преобразователя и всех элементов измерительного блока вакуумметра обеспечивается стабилизированными источниками напряжения. Структурная схема вакуумметра ВИ-14 показана на рис. 41.

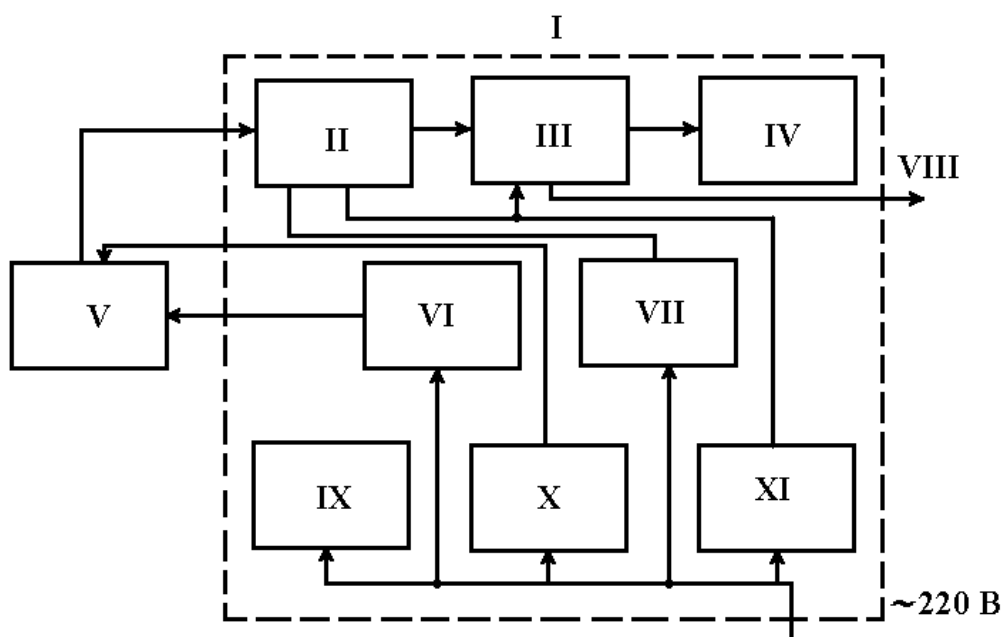


Рис. 41. Схема структурная вакуумметра ВИ-14:

I - измерительный блок; II - блок выносной БВ-14; III- усилитель постоянного тока У-4-1; IV - стрелочный индикатор; V - манометрический ионизационный преобразователь; VI - стабилизатор тока эмиссии СТ-2-2; VII - питание накала диода и реле СН-12,6; VIII - выход на записывающий прибор; IX - источник электронной бомбардировки преобразователя; X - источник анодного напряжения преобразователя СН-300; XI - питание усилителя постоянного тока и выносного блока М-7

2.1. Манометрические преобразователи

Манометрический ИМ-12

Преобразователь ИМ-12 предназначен для измерения давлений в диапазоне от 10^{-3} до $7 \cdot 10^{-8}$ Па (10^{-5} - 10^{-10} мм. рт. ст.).

Катод преобразователя эмитирует электроны, которые ускоряются электрическим полем в направлении анода и

ионизируют газ. Образующиеся положительные ионы уходят на отрицательно заряженный коллектор.

При неизменных токе эмиссии электронов и ускоряющем электроны анодном напряжении число образующихся ионов пропорционально молекулярной концентрации газа в межэлектродном пространстве преобразователя. Ионный ток, зависящий от величины давления, с коллектора преобразователя поступает на вход усилителя.

Коллектор выполнен в виде тонкой нити, расположенной по оси преобразователя. Малая поверхность коллектора обеспечивает достаточно малую величину фоновых токов, возникающего из-за фотоэмиссии электронов с коллектора под действием мягкого рентгеновского излучения анода. Это позволило понизить предел измеряемых давлений до 10^{-8} Па.

Манометрический преобразователь ПМИ-27

Преобразователь ПМИ-27 предназначен для преобразования измеряемого давления в ток, величина которого зависит от величины этого давления.

Наличие двух катодов, двух сочетаний электродных систем и, соответственно, двух режимов их работы обеспечивает измерение давления в широком диапазоне.

Чувствительности преобразователя K_1 и K_2 (для двух режимов работы преобразователя) указываются в паспорте датчика.

При индикации давлений в диапазоне от 10 до 10^{-2} Па первый катод, расположенный напротив неперфорированной части экрана, эмиттирует электроны, которые ускоряются полем положительно заряженного экрана и ионизируют газ в преобразователе. Образующиеся положительные ионы уходят на отрицательно заряженную сетку. При неизменных токе эмиссии и ускоряющем электроны напряжении на экране число ускоряющихся ионов пропорционально молекулярной концентрации газа в межэлектродном пространстве преобразователя. Ионный ток, зависящий от величины давления, с сетки преобразователя идет на вход усилителя.

Короткие траектории движения электронов от катода к экрану исключают паразитные вторичные процессы при индикации больших давлений, а значительно большая, по сравнению с нитью, катода, площадь ионного коллектора (сетки) обеспечивает

эффективность сбора положительных ионов, не зависящую от давления газа. Верхний предел индикаций ограничивается давлением, при котором ионный ток становится равным электронному току катода.

При индикации от 10^{-2} до 10^{-8} Па второй катод, расположенный напротив перфорированной части экрана, эмиттирует электроны, которые ускоряются полем положительно заряженной сетки и ионизируют газ в преобразователе. Образующиеся положительные ионы уходят на отрицательно заряженный коллектор. В этом случае на вход усилителя ионный ток, зависящий от величины давления, идет с коллектора. Нижний предел индикаций ограничивается наличием *фонового тока* коллектора, главной причиной появления которого является облучение коллектора мягким рентгеновским излучением, возникающим при торможении электронов в сетке (аноде). Малая поверхность коллектора, обеспечивающая достаточно малую величину фонового тока, и увеличение мощности прогрева преобразователя электронной бомбардировкой сетки позволили понизить предел индуцируемых давлений до 10^{-8} Па.

2.2. Конструкция вакуумметра ВИ-14

Вакуумметр ВИ-14 конструктивно состоит из измерительного блока, манометрических преобразователей ПМИ-27 и ИМ-12, кабелей для подключения манометрических преобразователей к измерительному блоку и кабеля для подключения к измерительному блоку самопишущего потенциометра.

2.3. Измерительный блок.

Измерительный блок обеспечивает измерение ионного тока манометрических преобразователей, их питание, а также прогрев анода (путем электронной бомбардировки).

Конструктивно измерительный блок оформлен в виде двух блоков измерительного и выносного. Измерительный блок выполнен как настольный прибор (рис. 41), при этом есть возможность установки его в различные стоечные устройства.

Основу конструкции измерительного блока составляет каркас из литых деталей, к которому крепятся шасси, передняя панель и обшивка. Выносной блок встроен в измерительный блок и при необходимости легко извлекается из него.

Таблица 8. Ручки управления измерительного блока

Ручки управления	
Обозначение	Назначение
«МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ»	Переключение поддиапазонов измерения. Переключение катодов и режима манометрического преобразователя ПМИ-27.
«ИЗМЕРЕНИЕ-ОБЕЗГАЖИВАНИЕ»	Переключение измерительного блока с режима измерения на режим обезгаживания. Выбор тока электронного обезгаживания.
«ШКАЛЫ ПРИБОРА»	Переключение с линейных шкал на логарифмические.
«УСТАНОВКА НУЛЯ»	Установка нуля усилителя постоянного тока.
«УСТАНОВКА ТОКА ЭМИССИИ»	Установка тока эмиссии манометрического преобразователя.
«СЕТЬ»	Включение прибора в сеть 220 В

Если выносной блок расположен внутри измерительного, то манометрический преобразователь может быть удален от измерительного блока не более, чем на 2 м. При необходимости удаления манометрического преобразователя от измерительного блока на расстояние более 2 м выносной блок вынимается из измерительного и соединяется с ним кабелем соответствующей длины. Расстояние между выносным блоком и преобразователем, как и в первом случае, остается равным 2 м.

Разъем для подключения выносного блока к измерительному блоку находится в отсеке для выносного блока.

На задней стенке выносного блока установлен разъем для подключения к измерительному блоку. На передней панели выносного блока находятся разъемы:

«КОЛЛЕКТОР» - для подключения коллектора преобразователя в режиме измерения;

«ПРОГРЕВ КОЛЛЕКТОРА» - для электронного обезгаживания коллектора;

«ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ» и «СЕТКА» - для подключения катодов, сетки и экрана преобразователя ПМИ-27 - (или катодов и сетки преобразователя ИМ-12) через специальную соединительную колодку, к которой, в свою очередь, подключены выводные концы преобразователя. Для доступа к элементам, установленным внутри измерительного блока, следует снять верхнюю и нижнюю обшивки.

На передней панели измерительного блока расположены органы управления, обозначения которых приведены в табл. 8; кроме того, на передней панели находятся:

стрелочный измерительный прибор; индикатор включения прибора в сеть; индикатор «КАТОД СГОРЕЛ».

На задней панели измерительного блока размещены сетевой предохранитель и клемма « $\oplus$ ». Там также находится контрольная панель, на которой расположены клеммы и регулировочные элементы, позволяющие контролировать выходные параметры отдельных блоков и устанавливать номинальный режим работы измерительного блока. На контрольной панели находятся: гнезда и резисторы для регулировки выходного напряжения источников питания (« + 300», « + 12,6») и напряжения 6,3 В («НАКАЛ ДИОДА 6Д6А»); клеммы источников питания (« + 40», « - 40»); клеммы (« $\oplus$ », « $\pm$ », « - » « + », «НАКАЛ ЭМ-10»); резисторы («КАЛИБРОВКА ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ ШКАЛ», «КОРРЕКТОР НУЛЯ», «УСТАНОВКА СМЕЩЕНИЯ ЭМ-10»); тумблер («ПМИ-27», «ИМ-12»).

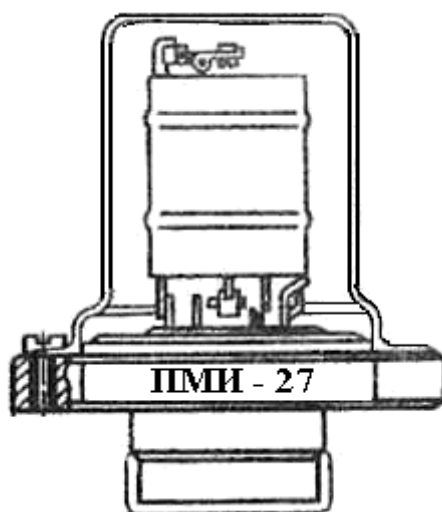


Рис. 42. Манометрический преобразователь ПМИ-27

2.4. Манометрические преобразователи

а) Манометрический преобразователь ПМИ-27.

Внешний вид преобразователя ПМИ-27 приведен на рис. 42.

Манометрический преобразователь ПМИ-27 представляет собой пятиэлектродный ионизационный преобразователь, имеющий два воздустойких сменных катода.

Катоды изготовлены из иридиевой, покрытой окисью иттрия,

проволоки диаметром 0,1 мм, длиной 44 мм и закреплены с внешней стороны сетки. Крепление катодов позволяет устанавливать их в натянутом состоянии и при необходимости производить быструю замену с помощью пинцета.

Сетка, имеющая диаметр 20 мм и выполненная в виде спирали из молибденовой проволоки диаметром 0,1 мм, навита на четыре траверсы. Торцы сетки закрыты плоскими молибденовыми сетками.

Коллектор представляет собой прямой вольфрамовый стержень со средним диаметром 0,07-0,08 мм. Он консольно приварен к центральному выводу цоколя и расположен по оси сетки.

Экран представляет собой перфорированный цилиндр, выполненный из молибденового листа толщиной 0,1 мм.

Сплошная часть экрана располагается напротив низковакуумного катода.

Все стеклянные изоляторы выводов, во избежание появления на них проводящих пленок, закрыты колпачками.

Электродная система преобразователя приварена к фланцу из нержавеющей стали и смонтирована на коваровом цоколе с семью коваровыми вводами, маркировка которых нанесена на внешней стороне цоколя в виде цифр.

Подсоединение электродов следующее:

низковакуумный катод - к вводам 1 и 6; высоковакуумный катод - к вводам 5 и 6;

сетка - к вводу 2; экран - к вводу 3; дополнительное крепление сетки - к вводу 4;

коллектор - к центральному вводу.

б) Манометрический преобразователь ИМ-12.

Внешний вид преобразователя ИМ-12 приведен на рис. 43. Преобразователь ИМ-12 смонтирован в стеклянной колбе и представляет собой триодный ионизационный манометр с осевым коллектором.

Электродная система преобразователя смонтирована на стеклянной ножке с пятью вводами.

Катод представляет собой вольфрамовую нить диаметром 0,1 мм, душной 45 мм и крепится с внешней стороны анода. Анод представляет собой двухзаходную молибденовую спираль с диаметром навивки 20 мм; диаметр проволоки 0,5 мм.

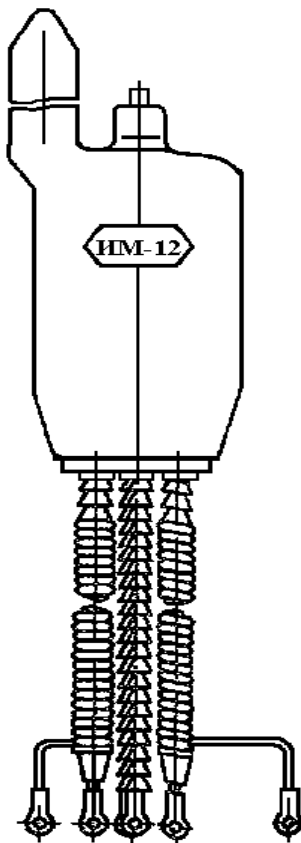


Рис. 43. Манометрический преобразователь ИМ-12

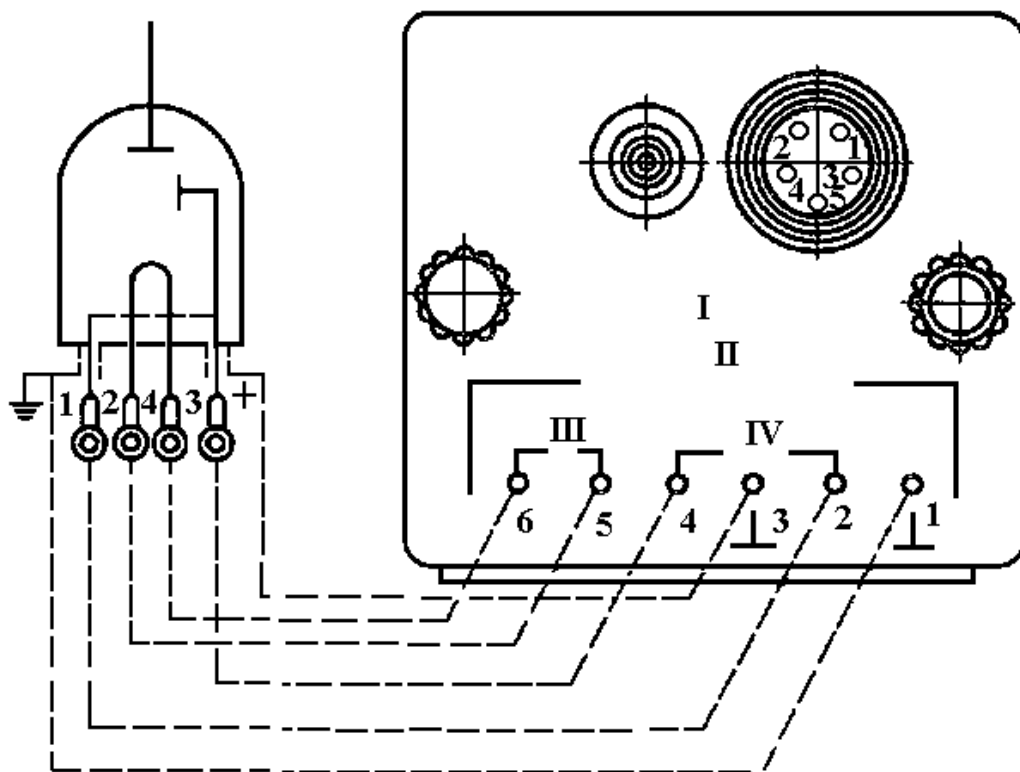


Рис. 44. Схема подключения преобразователя ИМ-12 к переходной колодке прибора: I– к блоку выносному БВ-14; II– к манометру ИМ-12; III – катод; IV – сетка

Коллектор выполнен в виде тонкого вольфрамового стержня и расположен по оси преобразователя; для уменьшения тока утечки вывод от него сделан в верхней части колбы.

Преобразователь смонтирован в стеклянной колбе диаметром 65 мм из стекла С49-2 (ЗС-5к). Защита подводящих проводов от внешнего прогрева осуществляется керамическими изоляторами. Анодные проводники, кроме того, защищаются заземленной металлической оплеткой.

Преобразователь присоединяется к вакуумной системе с помощью штенгеля диаметром 18 мм.

Поскольку колба преобразователя изготовлена из стекла С49-2 (ЗС-5к), то преобразователь может быть приварен к вакуумной системе, выполненной из такого же стекла. Нормальное положение преобразователя - вертикальное. К металлической вакуумной системе преобразователь может быть присоединен через коваровый переходник.

2.5. Кабели питания манометрических преобразователей и самопишущего прибора. Манометрические преобразователи подсоединяются к измерительному блоку с помощью кабелей длиной 2 м.

Подключение к измерительному блоку осуществляется:

- преобразователя ПМИ-27 - кабелем 4.853.067 Сп,
- преобразователя ИМ-12 - кабелем 4.853.068 Сп.

При работе с преобразователем ИМ-12 выносной блок, разъемы «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ», «СЕТКА» соединяются кабелем с соединительной колодкой (3.656.037 Сп, рис. 44), к которой подключается преобразователь ИМ-12.

Для записи показаний вакуумметра на самопишущем приборе используется соединительный кабель 4.860.182 Сп, который подключается к разъему «ЗАПИСЬ» измерительного блока вакуумметра.

3. ПОДГОТОВКА К ИЗМЕРЕНИЯМ

3.1. Для подготовки вакуумметра к работе необходимо:

- а) присоединить преобразователь ПМИ-27 (или ИМ-12) к вакуумной системе. Рабочее положение преобразователей предпочтительно вертикальное;
- б) соединить кабелем выносной блок (разъемы «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ», «СЕТКА») с соединительной колодкой

(разъем БВ-14), к которой подключается преобразователь ИМ-12;

в) выключить тумблер «СЕТЬ»;

г) включить шнур питания вакуумметра в сеть 220 В, 50 Гц.

ВНИМАНИЕ! 1. Включение вакуумметра при работе с преобразователем ПМИ-27 рекомендуется производить при давлении в обследуемой вакуумной системе не выше 10 Па (10^{-1} мм. рт. ст.), а включение при работе с преобразователем ИМ-12 разрешается только при давлении не выше 10^{-2} Па (10^{-4} мм. рт. ст.).

3.2. Включение вакуумметра при давлениях выше 10 Па для ПМИ-27 (выше 10^{-2} - для ИМ-12) может привести к перегоранию катода.

3.3. Перед выключением сети, во избежание зашкаливания указателя стрелочного прибора, необходимо установить тумблер «ИЗМЕРЕНИЕ-УСТАНОВКА НУЛЯ» в положение «УСТАНОВКА НУЛЯ», а тумблер «ИЗМЕРЕНИЕ-УСТАНОВКА ТОКА ЭМИССИИ» - в положение «УСТАНОВКА ТОКА ЭМИССИИ». После, этого выключить тумблер «СЕТЬ».

3.4. Порядок работы по измерению вакуума ионизационным вакуумметром ВИ-14 с манометрическим датчиком ИМ-12 описан выше в разделе 4.2. **3. Упражнение 3. Получение и измерение сверхвысокого вакуума»** на стр. 77-79.

3.5. Запись давления

Для записи показаний вакуумметра на самопишущем потенциометре вход последнего нужно подключить к разъему «ЗАПИСЬ», используя прилагаемый для этого кабель, а корпус вакуумметра соединить с корпусом самопишущего потенциометра. Запись можно производить на любом самопишущем, электронном потенциометре, имеющем предел измерения 10 мВ и время прохождения шкалы кареткой от 1 до 8 ч.

При работе на линейных шкалах напряжение на разъеме «ЗАПИСЬ» имеет величину 10 мВ на каждом поддиапазоне при отклонении стрелки измерительного прибора вакуумметра на всю шкалу.

При записи показаний вакуумметра на логарифмических шкалах для определения давления в миллиметрах ртутного столба рекомендуется изготовить масштабную линейку в соответствии с логарифмическими шкалами стрелочного прибора.

3.6. Обезгаживание преобразователя

Для обезгаживания преобразователя необходимо прогреть его в

электроды при температуре 400 ± 20 °С. Давление в преобразователе должно быть не выше 10^{-8} Па (10^{-10} мм. рт. ст.). После прогрева и остывания преобразователя производится обезгаживание путем электронной бомбардировки. Следует иметь в виду, что обезгаживание путем электронной бомбардировки с одновременным внешним прогревом преобразователя недопустимо. Электронное обезгаживание манометрического преобразователя следует проводить при давлении в вакуумной системе не выше $1 \cdot 10^{-5}$ Па (10^{-7} мм. рт. ст.).

Электронное обезгаживание производится следующим образом:

а) поставить тумблер «ИЗМЕРЕНИЕ-УСТАНОВКА ТОКА ЭМИССИИ» в положение «УСТАНОВКА ТОКА ЭМИССИИ», а переключатель «ШКАЛЫ ПРИБОРА» - в положение «Н» или «ЛИНЕЙНАЯ» (с коэффициентом K_v);

б) установить переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ-ОБЕЗГАЖИВАНИЕ» в положение «ОБЕЗГАЖИВАНИЕ»;

в) произвести регулировку тока эмиссии; плавная регулировка производится ручкой резистора «УСТАНОВКА ТОКА ЭМИССИИ», а грубая - переключателем «ИЗМЕРЕНИЕ-ОБЕЗГАЖИВАНИЕ».

Предел измерения стрелочного прибора при обезгаживании 100 мА.

Для обезгаживания коллектора преобразователя необходимо установить переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ-ОБЕЗГАЖИВАНИЕ» в положение «ИЗМЕРЕНИЕ» и только после этого подключить коллекторный ввод кабеля к разъему «ПРОГРЕВ КОЛЛЕКТОРА» выносного блока БВ-14, так как в положении «ОБЕЗГАЖИВАНИЕ» на разъеме «ПРОГРЕВ КОЛЛЕКТОРА» подается напряжение 450 В, затем переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ-ОБЕЗГАЖИВАНИЕ» вернуть в положение «ОБЕЗГАЖИВАНИЕ».

Примечание. Время отдельных этапов обезгаживания преобразователя устанавливается для каждого конкретного случая; оно зависит от скорости откачки насоса, степени чистоты и обезгаженности измерительного блока.

В режиме электронного обезгаживания можно измерять давление; при этом ток эмиссии должен быть 50 мА, а коллекторный ввод кабеля должен быть подключен к разъему «КОЛЛЕКТОР» выносного блока. Измерение давления можно

производить только на линейных шкалах. Величина давления определяется по формуле (15)

$$P = \frac{I}{5K_2}, \quad (15)$$

где P - давление, мм. рт. ст.; I - ток, А; K_2 - чувствительность манометрического преобразователя, А/мм. рт. ст.

Пример: Пусть переключатель «МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ» находится в положении

$\frac{10^{-7}}{K_2}$, а показание стрелочного прибора - 5 делений,

чувствительность $K_2 = 0,1$ А/мм. рт. ст. (для ПМИ-27). Давление в

объеме $P = \frac{5 \cdot 10^{-7}}{5 \cdot 0,1} = 1 \cdot 10^{-6}$ мм. рт. ст.

4. Измерение давления различных газов

Чувствительность преобразователей ПМИ-27 и ИМ-12 дана по сухому воздуху. Однако при помощи ионизационных преобразователей можно измерять давление любых газов и их смесей при условии, что они не вступают в химическую реакцию с конструкционными материалами преобразователей. Относительная чувствительность преобразователей ПМИ-27 и ИМ-12 по некоторым газам приведена в табл. 9.

Таблица 9. Относительная чувствительность преобразователей ПМИ-27 и ИМ-12 по некоторым газам

Относительная чувствительность K/K_v для газов						
Сухой воздух	H ₂	He	Ne	Ar	Kr	Xe
1,00	0,47	0,18	0,25	0,31	1,98	2,71

K_v - чувствительность преобразователя по сухому воздуху (принимается равной 1),

K - чувствительность преобразователя к различным газам.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Форвакуумный насос ЗНВР-1. Устройство, основные технические параметры и правила эксплуатации

1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ НАСОСА ЗНВР-1

1.1 Вакуумный пластинчато-роторный насос типа ЗНВР-1 (рис. 45) двухступенчатой конструкции с масляным уплотнением предназначен для откачки из герметичных объемов воздуха, химически неагрессивных газов и парогазовых смесей, предварительно очищенных от капельной влаги и механических загрязнений, от атмосферного давления до предельного остаточного.

1.2 Насосы не пригодны для откачки газов с содержанием кислорода большим, чем в воздухе при нормальных условиях (21% по объему).

1.3. Насос может непрерывно работать

- в течение 16 часов в сутки, откачивая емкость суммарным объемом не более 1 м³, имеющим газовыделение и натекаание не более 0,133 л-кПа/с;

- круглосуточно, при давлении на входе в насос менее 0,133 кПа.

Отметим только, что в целях предотвращения утечки масла и натекания воздуха из атмосферы в цилиндр вал ротор второй ступени уплотнен манжетой 51.

- Вход откачиваемого газа в первую ступень насоса осуществляется через оливку 8, установленную в стойке и уплотненный уплотнителем 19. Для предотвращения попадания твердых частиц в насос во входном канале стойки фильтр 9.

- Выхлоп из камеры второй ступени осуществляется через выхлопной клапан 25, установленный на цилиндре второй ступени. Ввиду разности объемов цилиндров первой и второй ступени при работе насоса в цилиндре первой ступени возникает большое давление. Стравливание последнего осуществляется через клапан, установленный на цилиндре первой ступени.

Объем камеры первой ступени в два раза больше объема камеры второй ступени, вследствие чего возможно излишнее сжатие откачиваемого газа

на входе во вторую ступень. Каждый клапан установлен в корпусе 26 и прижимается к седлу пружиной 23.

- В верхней части корпуса 12 установлена пробка 16 с отверстиями «б» для выхлопа откачиваемого газа.

Масло в насос заливается через отверстие в корпусе насоса при вывернутой пробке 16.

- Для уменьшения выброса масла с газами через выхлопные клапаны на их корпуса 26 надеты сетки 22, закрепленные кольцами 24. Для этой же цели внутри корпуса установлен экран 18, закрепленный винтами 17.

Слив масла из насоса производится через отверстие в корпусе при вывернутой пробке 41. При установке на место сливная пробка уплотняется прокладкой 42.

- Насос снабжен газобалластным устройством, которое предназначено для напуска в полость сжатия второй ступени балластного газа при откачке парогазовых смесей с целью предотвращения их конденсации в насосе.

Газобалластное устройство имеет два положения: «открыто» и «закрыто». Оно состоит из корпуса 29, пробки 27, уплотнителей 28, 30 и тарелки 31.

3. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ НАСОСА ЗНВР-1

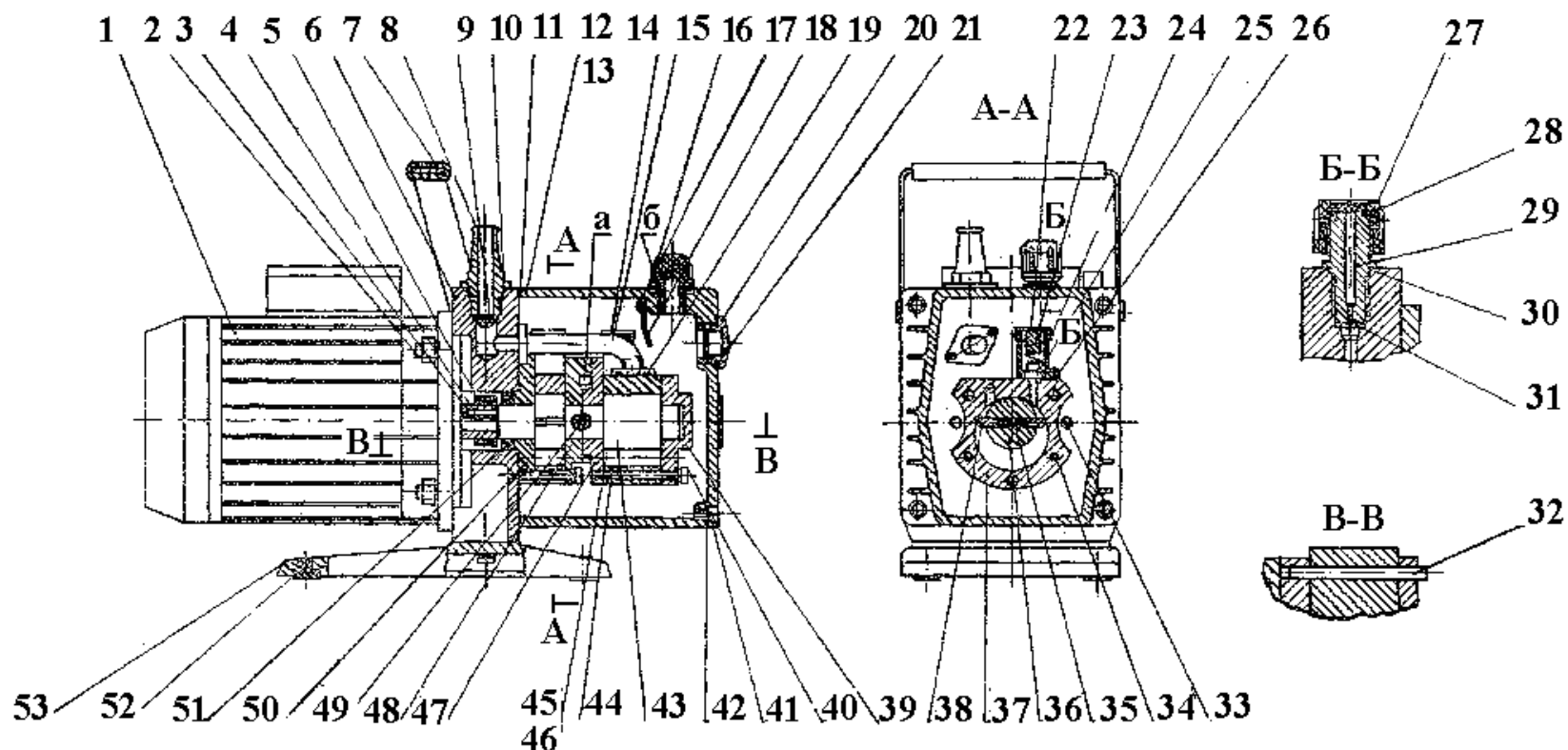


Рис. 45. Насос вакуумный пластинчато-роторный ЗНВР-1Д: 1 — электродвигатель; 2 — шпильки М8; 3 — полумуфта; 4 — шпонка; 5 — вкладыш; 6 — стойка; 7 — ручка; 8 — оливка; 9 — фильтр; 10 — уплотнитель; 11 — прокладка; 12 — корпус; 13 — винты М6; 14 — клапан; 15 — трубопровод; 16 — пробка; 17 — винты; 18 — экран; 19 — уплотнитель; 20 — маслоуказатель; 21 — уплотнитель; 22 — сетка; 23 — пружина; 24 — кольцо; 25 — клапан; 26 — корпус клапана; 27 — пробка; 28 — уплотнитель; 29 — корпус; 30 — уплотнитель; 31 — тарелка; 32 — штифт; 33 — шпилька М5; 34 — штифт; 35 — пружина; 36 — ротор; 37 — цилиндр; 38 — пластина; 39 — крышка; 40 — винт М6; 41 — пробка; 42 — прокладка; 43 — ротор; 44 — цилиндр; 45 — пластина; 46 — пружина; 47 — крышка; 48 — крышка; 49 — амортизатор; 50 — амортизатор; 51 — амортизатор; 52 — амортизатор; 53 — основание.

1.4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСОВ ТИПА ЗНВР

Наименование	Величина	
	ЗНВР-1Д	ЗНВР-1ДМ
1. Быстрота действия в диапазоне давлений от атмосферного до 0,13кПа, м³/с 10 ⁻³ (л/с). - наибольшее рабочее давление на входе в насос: - наибольший откачиваемый объем	1 от 20 до 1,3·10 ⁻³ кПа около 1 м³.	
2. Предельное остаточное давление Па (при использовании нижеперечисленных марок вакуумных масел), не более: ВМ-1 ГОСТ 23013-78 ВМ-1 «И» ТУ 38-101-624-76 или ВМ-5 ГОСТ 23013-78 ВМ-6 ГОСТ 23013-78 ВМ-6 «И» ТУ 38-101-624-76	6,7·10 ⁻³ (5·10 ⁻⁴) 1,1·10 ⁻¹ (3·10 ⁻³) 1,3·10 ⁻³ (1·10 ⁻²)	
3. Количество заливаемого в насос масла, м³·10 ⁻³ не более	0,4	
4. Давление паров воды на входе в насос, кПа, не более	3,3(25)	
5. Мощность электродвигателя, кВт	0,25	0,18
6. Напряжение сети, В	380	220
7. Наибольшая мощность, потребляемая насосам при давлении на входе (33 ± 6,6) кПа (250± 50 мм. рт. ст.), кВт	0,3	
8. Масса, без учета масла, кг	9,5	10

ПРАВИЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ ВАКУУМНОГО НАСОСА ЗНВР-1

4. Запуск насоса производится в следующем порядке:

- а) Включить электродвигатель;
- б) Открыть через 15-20 минут работы насоса газобалластное устройство, отвернув пробку 27 (рис. 45) на 2-3 оборота, на период не менее 30мин.
- в) Открыть медленно запорный вентиль.

При этом необходимо помнить, что

- Откачивание парогазовых смесей производится только при

открытом газобалластном устройстве !

- До начала откачивания паров во избежание их конденсации и осмоления вакуумного масла насос должен дойти до рабочей температуры, т.е. проработать в течение часа с закрытым вентилем при открытом газобалластном устройстве.

- При откачке паров и парогазовых смесей рекомендуется снабжать насосы ловушками - отстойниками по одной на стороне всасывания и выхлопа. Ловушки-отстойники предназначены для сбора конденсата, который может образоваться в трубопроводах.

- Рекомендуется менять рабочие масла первых 100 часов работы. В дальнейшем периодичность смены масла зависит от откачиваемой среды и режима работы насоса и определяется опытным путем.

- При первом запуске, а также после продолжительных перерывов в работе или после заправки свежим маслом конечный вакуум достигается насосом не сразу, а по истечении некоторого времени, необходимого для обезгаживания насоса.

Остановка насоса производится в следующей последовательности:

а) перекрыть вентиль на всасывающем трубопроводе;

б) закрыть газобалластное устройство, если оно было открыто;

в) выключить электродвигатель и одновременно напустить воздух в насос.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Сверхвысоковакуумный насос НМД-016М

1. Указания мер безопасности:

Насос НМД-0,16 с блоком питания работает при постоянном электрическом напряжении 7000 В. Во время эксплуатации корпус насоса может разогреваться до + 250 °С.

Основными источниками опасности являются:

- высоковольтный выпрямитель блока питания;
- корпус насоса, который может нагреваться до температуры +250 °С при длительной работе насоса;
- магнитная система насоса, - силы притяжения магнитов могут при неосторожной сборке - разборке защемить руки сборщика.

Основные меры предосторожности при работе с насосом и блоком питания:

- работа насоса возможна только при наличии защитных кожухов, исключающих возможность прикосновения к нагретым поверхностям насоса;
- внешним осмотром убедитесь в наличии и исправности заземления корпуса насоса и блока питания.
- убедитесь, что в высоковольтном кабеле блока питания имеется блокировка, исключающая включение блока питания при отключенном высоковольтном (+ 7000 В) разъеме;
- перед присоединением блока питания к насосу или сети электропитания необходимо выключить на блоке питания все сетевые тумблеры и соответствующие автоматы в электрощитах сети электропитания;
- перед включением насоса в работу вывесить предупредительные плакаты;
- во время работы следить за исправностью сигнализации блока питания;
- после окончания работы все сетевые тумблеры и соответствующие автоматы в электрощитах сети электропитания должны быть выключены, предупредительные плакаты сняты;
- *во всех аварийных случаях (прорыв атмосферы, неисправность токопроводов, блока питания, пожар) прежде всего обесточьте установку с насосом и только после этого примите меры по ликвидации аварии;*
- тушение загоревшегося электрооборудования производите только

углекислотным огнетушителем или жидким азотом.

Расшифровка названия насоса НМД-0,16-1:

Н – насос; М – магнитноразрядный, Д – диодный; 0,16 – быстрота действия в тысячах литров в секунду; 1 – порядковый номер модификации.

Расшифровка названия блока питания БП – 138 насоса НМД-0,16-1:

Б – блок, П – питания, 138 – порядковый номер регистрации блока питания.

Назначение насоса НМД-0,16-1

Насос НМД-0,16-1 с блоком питания БП-138 предназначен для получения в вакуумных системах высокого и сверхвысокого вакуума при безмасляной откачке газов и газовых смесей.

Насос не предназначен для откачки инертных газов и длительной откачки водорода (инертные газы и водород могут откачиваться только в виде примесей к химически активным газам, имеющим атомный вес выше 14) и снижает свою работоспособность при откачке углеводородов (уменьшается быстрота действия и увеличивается предельное остаточное давление).

При откачке химически агрессивных газов, паров и их смесей, воздействующих на материал конструкции, насос выходит из строя. Насос рассчитан на откачку до давления ниже $6,7 \cdot 10^{-8}$ Па прогреваемых вакуумных систем, имеющих безмасляную форвакуумную систему. Натекание в вакуумную систему должно быть не более ($5 \cdot 10^{-9}$ л · мм рт. ст./с).

2. Сверхвысоковакуумный насос Нмд-0,16-1: основные технические характеристики

- Наибольшее давление запуска насоса составляет 1,33 Па ($1 \cdot 10^{-2}$ мм. рт. ст.);
- Предельное остаточное давление, создаваемое насосом, $P = 6,7 \cdot 10^{-8}$ Па;
- Наибольшая быстрота действия по воздуху в одной из точек диапазона $1,33 \cdot 10^{-3}$ - $33 \cdot 10^{-6}$ Па рабочих давлений насоса 135 ± 25 л/с;

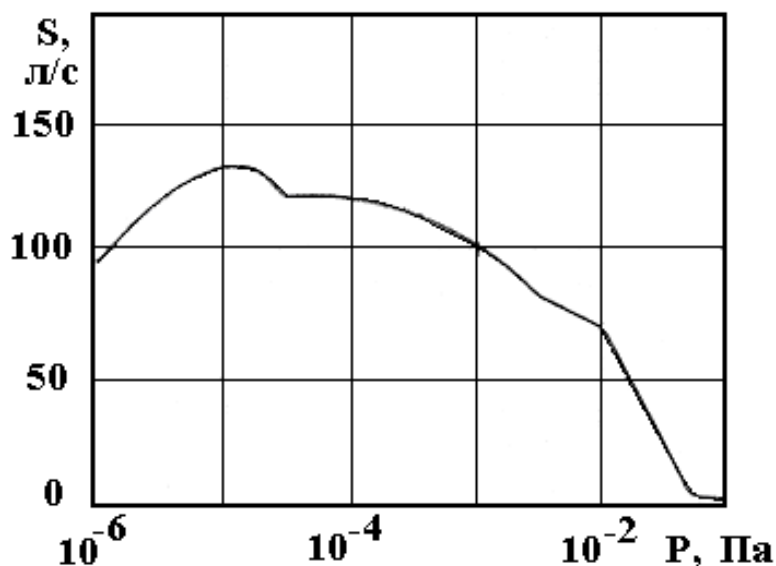


Рис. 46. Зависимость скорости откачки от давления $S = F(P)$ для насоса НМД-0,16-1

- Напряженность магнитного поля по центру рабочих зазоров магнитной системы по всей их высоте не менее 96000 А/м (1200 Э);
- Питание насоса осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В с частотой $50 \pm 0,5$ Гц.
- Максимальная электрическая мощность, потребляемая блоком питания с насосом, - 2500 Вт.
- Зависимость быстроты действия насоса от давления на входе в насос показана на рис. 46.
- Насос обеспечивает достижение давления обезгаженной прогретой вакуумной системы объемом до $0,02 \text{ м}^3$ не более чем за 10 мин.

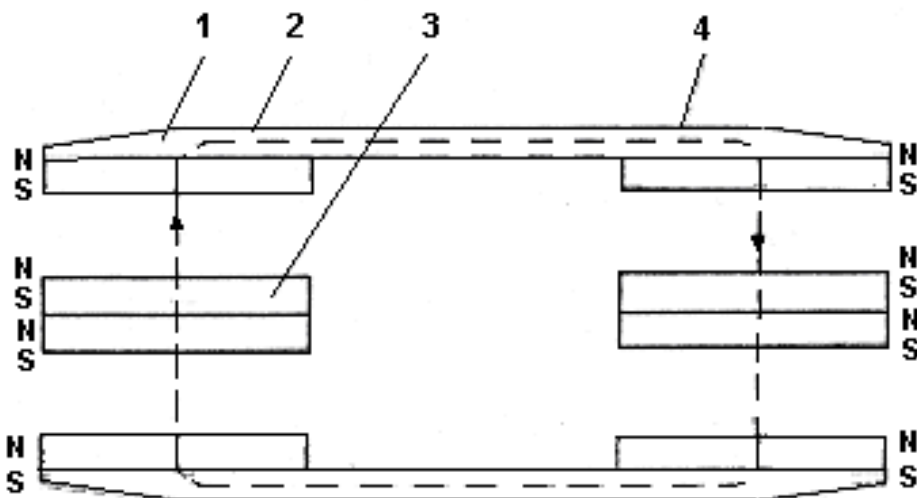


Рис. 47. Схема магнитной системы насоса НМД-0,16-1:
1 – магнитопровод, 2 – магнитный поток, 3 – магнитный блок, 4- рабочий зазор

3. Устройство и работа насоса

- Работа насоса основана на поглощении газа материалом катода (титаном) разрядной системы, распыляемым при высоковольтном разряде в магнитном поле. Принципиальная схема конструкции насоса была показана выше.
- Основным конструкционным материалом насоса является немагнитная сталь марки 12Х18Н10Т.
- Магнитопроводы (рис. 47) изготовлены из стали марки 10, магнитные блоки - из оксидно-бариевых плиток марки 22БА220 (2,8 БА).
- Уплотнение разъемных вакуумных соединений насоса осуществляется прокладками толщиной 0,5 мм из отожженной бескислородной меди.
- Для запуска насоса в работу необходимо наличие безмасляной системы предварительной откачки, создающей давление ниже 1,33 Па.
- Рабочее положение насоса — любое, но предпочтительнее, чтобы плоскости катодов (плоскости карманов корпуса насоса) находились в вертикальной плоскости.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Магниторазрядный триодный насос ТРИОН-150 (НМТО-0,1-1.)

Принцип работы насоса

Работа насоса (рис. 48) основана на поглощении газов титаном, распыляющимся при высоковольтном разряде в магнитном поле. Разряд поддерживается между анодом и катодом. Благодаря применению ячеистого катода 2 возрастает скорость откачки инертных газов. Охлаждение анода 1 и коллекторов 3 насоса жидким азотом приводит к увеличению предельного разряжения, сокращению времени его достижения и повышению быстроты откачки газов в области высокого вакуума. Охлаждение водой повышает давление запуска и наибольшее давление устойчивой работы насоса.

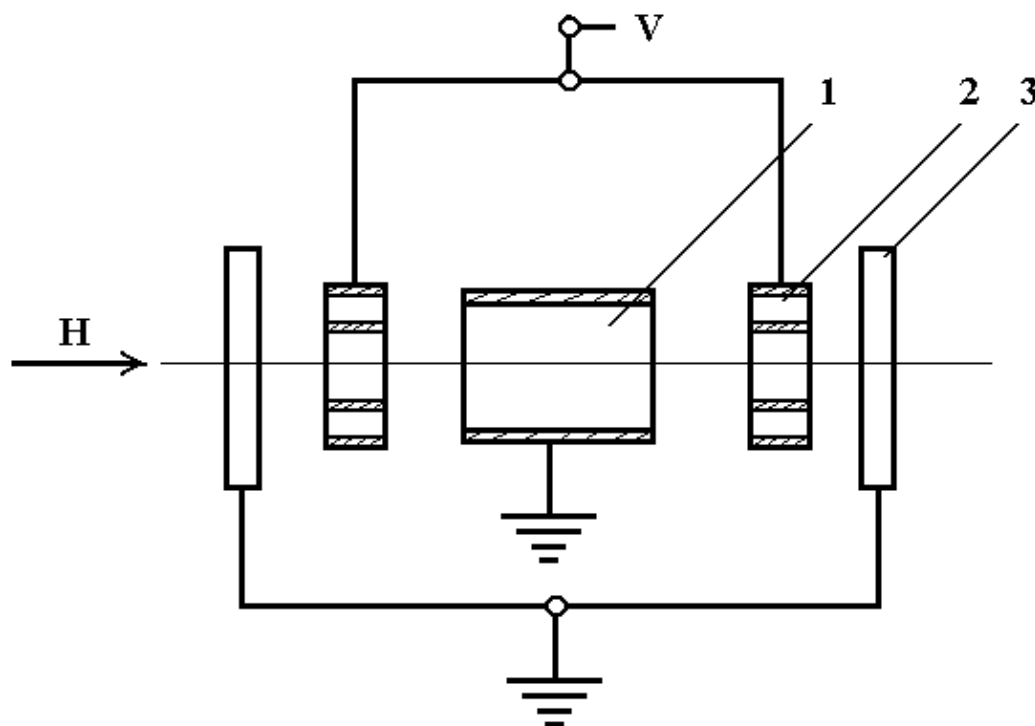


Рис. 48. Схема электродного блока насоса ТРИОН-150 (НМТО-0,1-1.):
1 – анод; 2 – катод; 3 – коллектор

Конструкция насоса ТРИОН-150 (НМТО-0,1-1.)

1. Конструкция насоса показана на рис. 49.
2. Корпус насоса 1 представляет герметичный сосуд с фланцем для подсоединения откачиваемого объема к патрубкам для высоковольтного ввода.
3. Электродный блок 2 состоит из анода, четырех катодов и коллекторов.

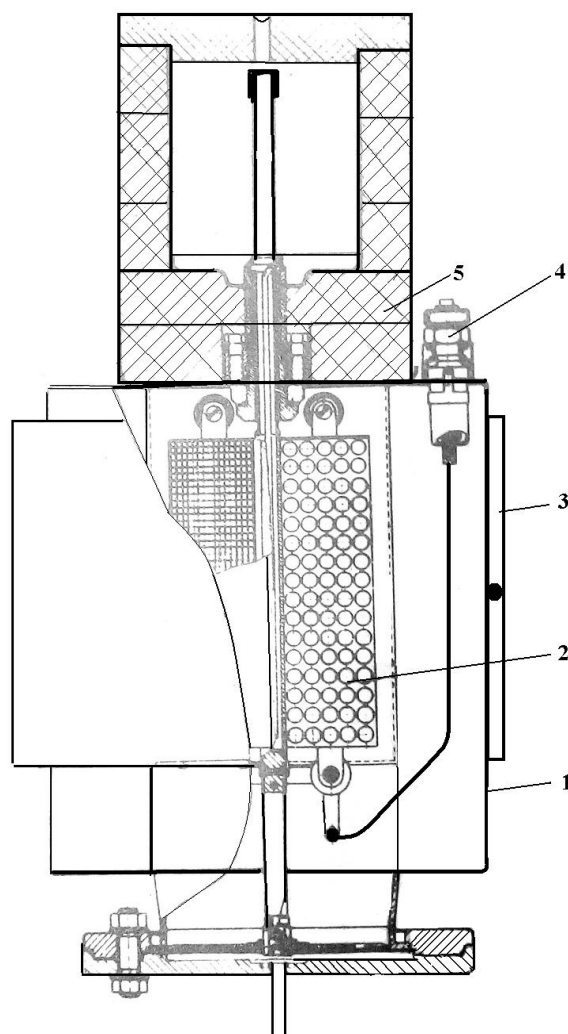


Рис. 49. Конструкция насоса ТРИОН – 150 (НМТО - 0,1-1.): 1 - корпус насоса; 2 – электродный блок; 3 – магнитная система; 4 – высоковольтный вакуумный токоввод; 5 – система охлаждения насоса

Охлаждаемые анод и коллекторы находятся под потенциалом корпуса насоса.

Анод припаян, а коллекторы приварены к стержню, во внутреннее отверстие которого подается охлаждающая жидкость. Катоды насоса, работающие при высоком напряжении, крепятся к аноду с помощью керамических изоляторов, защищенных от запыления экранами из нержавеющей стали.

4. Высокое выпрямленное напряжение подается на катоды через высоковольтный вакуумный токоввод 4. Высоковольтным вакуумным изолятором токоввода служит втулка из высокоглиноземистой керамики, соединенной с металлической арматурой вакуумной пайкой.

5. Съемная фишка разъема высоковольтного вакуумного токоввода соединяется с блоком питания БП – 150, экранированным высоко-

вольтным проводом.

6. Магнитная система 3 состоит из магнитопровода и оксидно-бариевых магнитных плиток. Напряженность магнитного поля в средней области рабочего зазора магнитной системы – 1500 Эрстед.

7. Система охлаждения насоса 5 состоит из полого стержня, находящегося в тепловом контакте с анодом и коллекторами, и сосуда для жидкого азота, теплоизолированного пенопластом. Жидкий азот поступает по трубке меньшего диаметра в полость стержня, охлаждая анод и коллекторы. В случае водяного охлаждения вместо сосуда для жидкого азота на насос устанавливается штуцер для подключения к водопроводу.

Примечание. В случае эксплуатации насоса при температуре окружающей среды ниже 0 °С необходимо предусмотреть меры, предотвращающие замерзание воды в системе охлаждения.

2. Технические данные

1. Предельное остаточное давление (охлаждение жидким азотом), $2 \cdot 10^{-8}$ Па

2. Наибольшее давление запуска насоса (охлаждение водой) 5 Па

3. Наибольшее рабочее давление (охлаждение водой) $8 \cdot 10^{-2}$ Па

4. Быстрота действия по воздуху при давлении $8 \cdot 10^{-4}$ Па 80 л/сек

5. Расход жидкого азота при давлении в насосе меньше $5 \cdot 10^{-5}$ Па 0,5 л/час

7. Насос питается от блока питания БП-150.

Блок питания насоса ТРИОН – 150 (НМТО - 0,1-1.) работает от однофазной сети переменного тока напряжением.....220 В

Правила эксплуатации насоса ТРИОН – 150 (НМТО - 0,1-1.)

1. Для получения паспортных характеристик насос должен быть обезгажен не менее 5 часов прогревом внешним электронагревателем при температуре + 400 – 450 °С с одновременной откачкой безмасляной системой, например, цеолитовыми насосами.

2. Последовательность действий при прогреве насоса:

а) снять фишку высоковольтного разъема;

б) снять шланги водяного охлаждения вместе со штуцером или сосуд для жидкости азота;

в) снять с насоса магнитную систему;

г) откачать насос до давления ниже 1 Па;

д) включить электронагреватель.

Примечание:

- Во время прогрева необходимо вести контроль температуры при помощи термопарных датчиков и контролировать вакуум в прогреваемом насосе. Давление во время прогрева должно быть не выше 5 Па. К концу прогрева давление должно быть выше 1 Па.

- Откачка во время прогрева ведется цеолитовыми насосами или какой-либо другой системой безмасляной откачки. Прогрев насоса производить в течение 5 часов. Для получения предельного разрежения порядка $1 \cdot 10^{-6}$ Па время прогрева может быть уменьшено до 2-3 часов.

4. После прекращения прогрева при температуре около $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ закрыть вентиль откачивающей системы.

5. Прогрев и испытание насоса производить по схеме рис. 50.

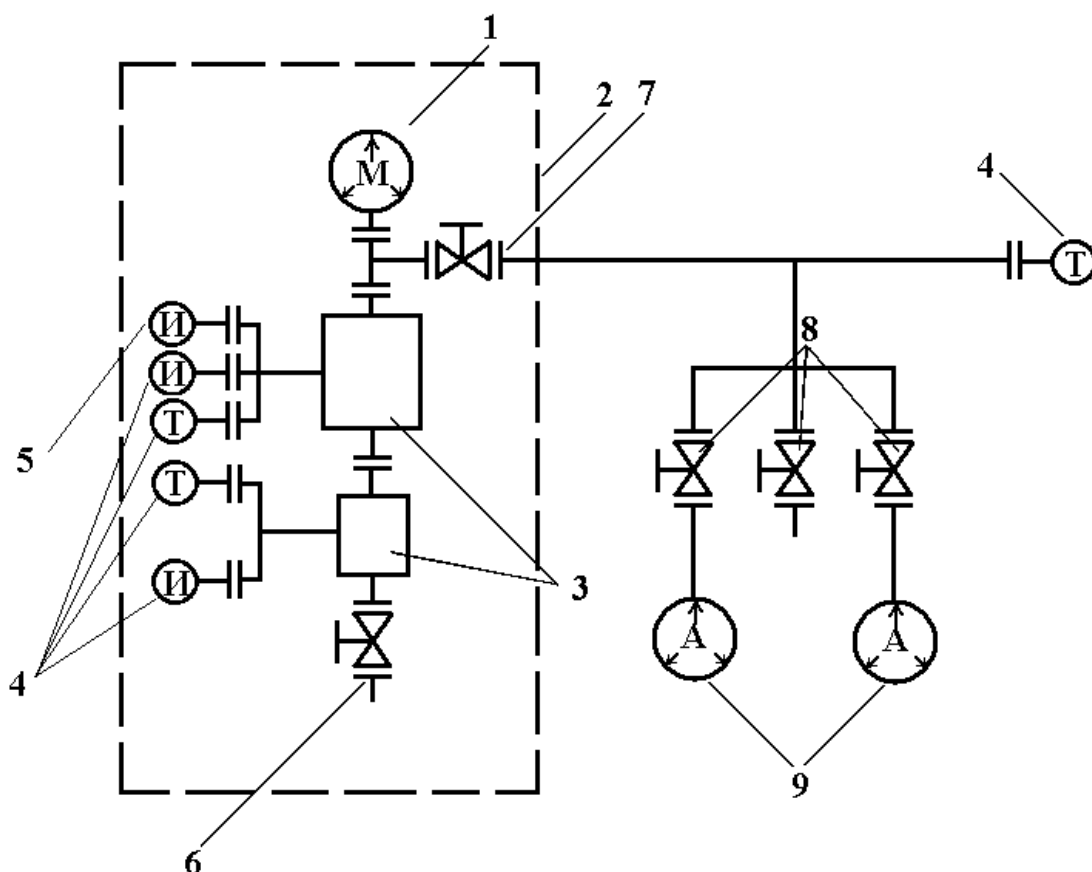


Рис. 50. Принципиальная схема откачного поста для прогрева и испытаний насоса: 1- испытываемый насос; 2 – область прогрева; 3 – технологический колпак; 4 – манометрические датчики вакуума для измерения в диапазоне $10 - 10^{-1}$ Па; 5 – манометрический датчик для измерения вакуума в диапазоне $10^{-5} - 10^{-10}$ Па; 6 – прогреваемый микронагреватель; 7 – прогреваемый вентиль; 8 – вентиль с металлическим уплотнителем; 9 – адсорбционные цеолитовые насосы.

Порядок работы

1. Установить на насос магнитную систему.
2. Закрепить на насосе ввод и шланги для подачи воды.
3. Заземлить корпус насоса и блока питания.
4. Соединить разъем высоковольтного токоввода насоса с источником питания.
5. Откачать вакуумную систему насоса до давления ниже 5 Па.
6. Подать воду в систему охлаждения насоса.
7. Включить сетевой выключатель блока питания.
8. При уменьшении давления в насосе отключить систему предварительной откачки (уменьшение давления сопровождается уменьшением разрядного тока).
9. После получения предельного вакуума и его измерения можно выключить блок питания БП–150.

ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Сверхвысоковакуумный гелиевый заливной криогенный насос повышенной производительности

Исследования в области вакуумной техники и опыт эксплуатации вакуумного оборудования с различными средствами откачки показали, что наиболее эффективными высоко- и сверхвысоковакуумными насосами являются гелиевые заливные крионасосы. Они по своим характеристикам оказались отвечающими основным требованиям современной технологии изготовления электронно-лучевых, фотоэлектрических, полупроводниковых приборов, элементов на основе интегральных схем. Кроме того, этот тип крионасосов показал свою высокую эффективность при откачке крупногабаритных технологических исследовательских камер большой емкости до 1000 м^3 , ускорителей заряженных частиц, имитаторов космического пространства, установок для выращивания монокристаллических кристаллов, установок термоядерного синтеза.

Заливные крионасосы в качестве откачивающего элемента имеют боковую поверхность цилиндрического сосуда, заполняемого жидким гелием, а их шевронный экран выполнен вдоль по образующей цилиндра и расположен коаксиально вокруг боковой поверхности этого сосуда. Такие крионасосы, хотя и обладают в несколько раз большей быстротой действия по сравнению с конструкциями плоскопараллельной схемы при тех же диаметрах гелиевых сосудов, имеют главный недостаток, часто являющийся определяющим, - занимают полезное пространство рабочей камеры, что не всегда допустимо. Кроме того, они имеют значительно большие расходы криоагентов из-за повышенных радиационных тепловых потоков, падающих на шевронный экран и криопанель от стенок камеры и других источников тепла располагаемых в ней.

С целью создания крионасосов, частично лишенных недостатков вышеперечисленных конструктивных схем, были разработаны и созданы несколько конструкций крионасосов с так называемый охватываемой зоной откачки, одна из модификаций которых приведена на рис. 51.

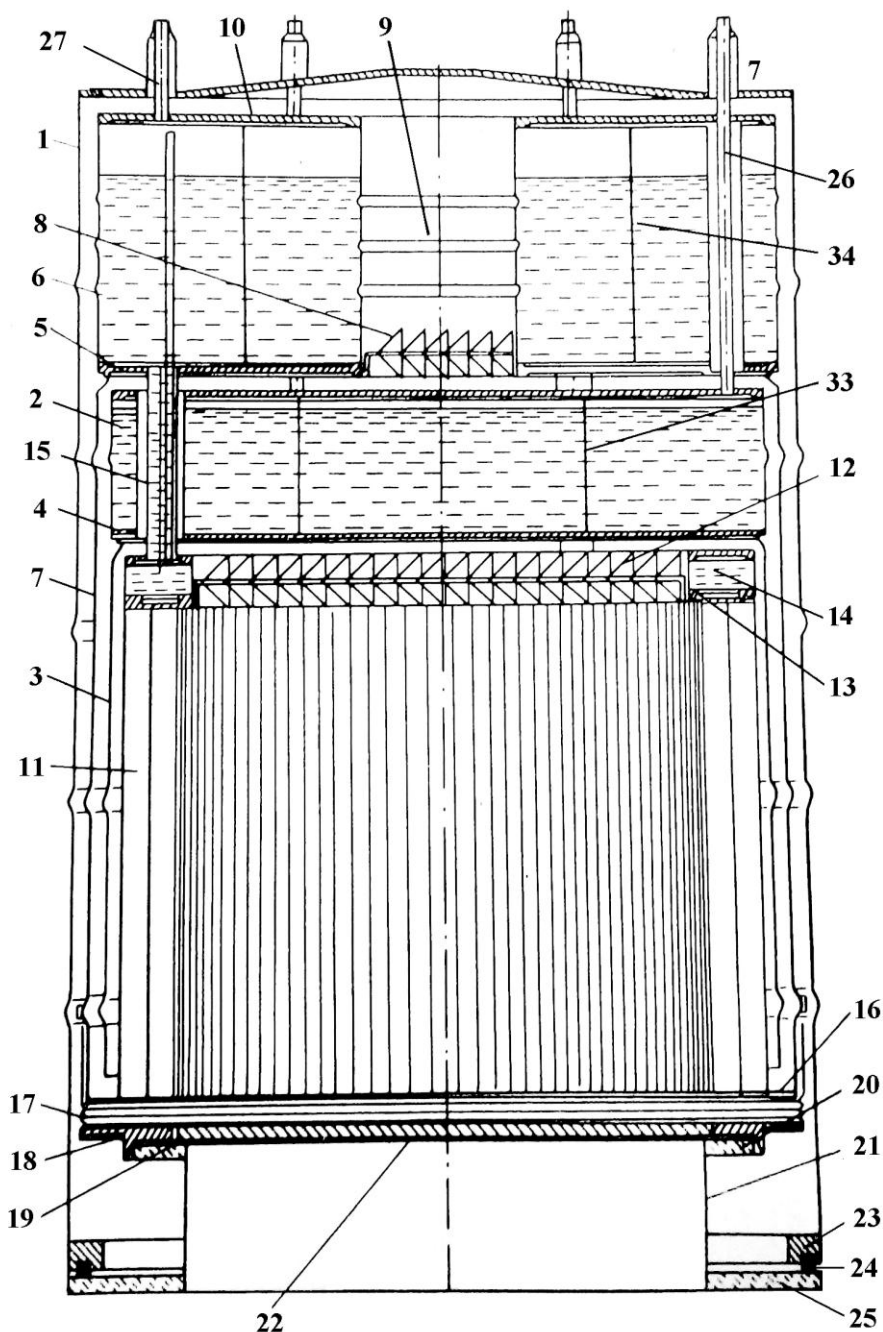


Рис. 51. Сверхвысоковакуумный гелиевый крионасос с охватываемой зоной откачки в разрезе

Криогенный насос содержит корпус 1, откачивающий элемент в виде сосуда 2, заполняемого жидким гелием, и обечайки 3, приваренной к днищу 4 сосуда 2. Откачивающий элемент снаружи окружён днищем 5 сосуда 6, заполняемого жидким азотом, обечайкой 7, приваренной к днищу 5, и шевронным экраном 8, перекрывающим центральный канал 9 в сосуда 6, который соединяет полость между корпусом 1 и наружными поверхностями обечайки 7 и крышки 10 с

полостями, окружающими откачивающий элемент. Внутренняя поверхность обечайки 3 окружена цилиндрическим 11, а днище 4 - плоским 12 шевронными экранами. Верхняя часть экрана 11 сварена с экраном 12 и с хорошим тепловым контактом состыкована с днищем 13 кольцевого сосуда 14 (рис. 52), полость которого с помощью трех трубок 15 сообщается с полостью сосуда 6 (рис. 51). В нижней части шевронный экран 11 стыкуется с кольцом 16, приваренным к обечайке 7 (рис. 52). К ней же приварен тонкостенный тепловой мост 17 сильнофоноподобного вида, к нижней части которого привязан кольцевой фланец 18 с притертой поверхностью 19, плотно прилегающей к поверхности кольцевого фланца 20 входного патрубка 21 рабочие камеры. При необходимости на этот фланец 20 может быть герметично установлена плита 22 со смонтированными на ней узлами (например, молекулярными пушками, держателями образцов и другими элементами).

Корпус 1 в нижней части имеет кольцевой фланец 23 с резиновым уплотнением 24, с помощью которого крионасос вакуумно-плотно стыкуется с кольцевым фланцем 25 входного патрубка 21.

Сосуд 2 имеет две трубки 26, а сосуд 6 – три трубки 27 для заливки криоагентов и выхода их паров. Для наблюдения за технологическим процессом в рабочей зоне, охватываемой экранами 11, 12 и плитой 22, а также для обеспечения возможности шлюзования образцов в боковой поверхности элементов 1, 3, 7, 11 крионасоса предусмотрены, например, смотровые окна 28 и 29 (рис. 53) или вводы шлюзовых устройств, неподвижные 30, 31 и подвижные 32 патрубки. Кроме того, в боковой поверхности корпуса 1 имеется патрубок с фланцем (на рисунках не показан), к которому стыкуется через вакуумный клапан насос предварительной безмасляной откачки, например сорбционный насос, охлаждаемый жидким или твердым азотом. Для исключения подвижности поверхностей крышек и днищ сосудов 2 и 6 при вакуумировании насоса к ним приварены перфорированные обечайки 33 и 34 (рис. 51).

Наружный диаметр корпуса крионасоса 0,5 м, высота 0,8 м, диаметр и высота охватываемой зоны откачки соответственно 0,36 и 0,33 м. Объем гелиевого сосуда 15 л, азотного 30 л. Ресурс непрерывной работы крионасоса после однократной заливки жидкого гелия - 1 месяц при рабочем давлении не выше 10^{-5} Па. Необходимая периодичность дозаправки насоса жидким азотом - не реже 1 раза за трое суток.

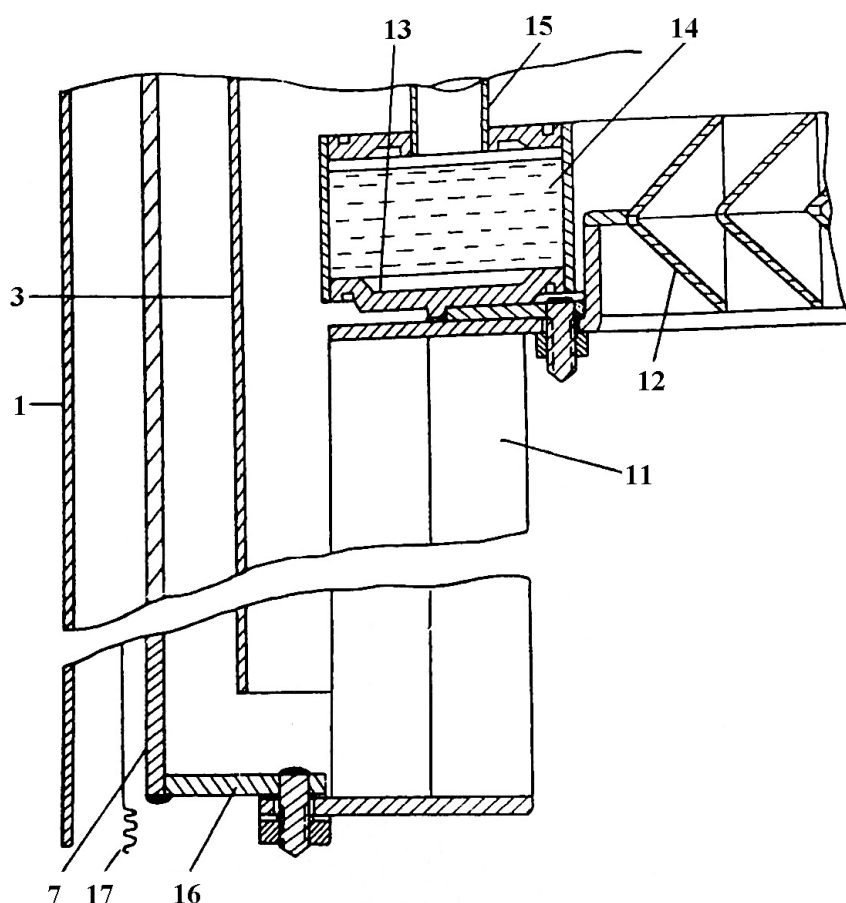


Рис. 52. Узлы криопанеля шевронных экранов крионасоса

Запуск насоса и его работа осуществляется следующим образом:

Насос опускают до соприкосновения уплотнительной прокладки 24 с фланцем 25, при этом произойдет подпружиненное прилегание притертых поверхностей 19 и 20 за счет моста 17. При отсутствии плиты 22 патрубок 21 является выходным патрубком, соединяющим крионасос с откачиваемой камерой, стыкуемой, например, с помощью металлического уплотнения с фланцем 25. При наличии плиты 22, например, в напылительной установке или установке молекулярно-пучковой эпитаксии, смонтированные на ней технологические узлы после опускания крионасоса оказываются непосредственно в охватываемой зоне откачки.

Далее откачивают вакуумируемый объем до давления около 40 Па, например, форвакуумным механическим насосом. Как известно, этот режим откачки полностью безопасен от миграции паров масла механического насоса в откачиваемый объем. Затем дальнейшую откачку до давления 10^{-1} - 10^{-3} Па ведут любым безмасляным насосом, лучше всего адсорбционным насосом, подсоединен-

ным через клапан также к боковой поверхности корпуса 1. После этого сосуд 6 заполняют жидким азотом и давление, как правило, снижается до 10^{-3} - 10^{-5} Па после охлаждения сосуда, экрана 7 и шевронных экранов (через 20 - 40 минут после начала заполнения сосуда 6). Далее заливают жидкий гелий в сосуд 2, причем с целью экономии его целесообразно провести предварительное охлаждение стенок сосуда 2 и экрана 3 жидким азотом до 90 - 110 К путем заливки 2-3 л азота через одну из двух трубок 26 с контролем температуры с помощью термопары, отпускаемой через вторую трубку 26.

После заполнения сосуда 2 жидким гелием производят формирование на внутренней поверхности обечайки 3 и на днище 4 слоя криосорбента, если по условиям технологического процесса ожидается большое газовыделение водорода (до 10 - 100 м³ Па).

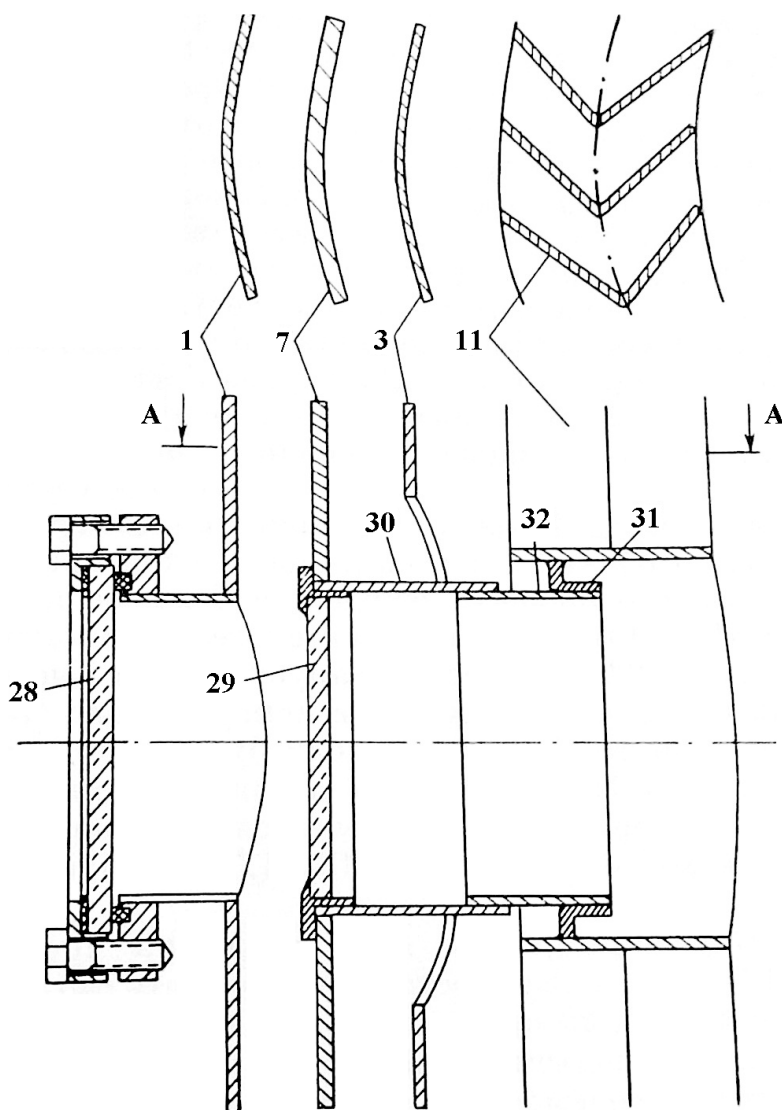


Рис. 53. Смотровые окна, вмонтированные крионасос

Для этого через натекаТЕЛЬ, пристыкованный к рабочей камере либо к плите 22, производят напуск аргона высокой частоты или азота при давлении напуска, измеряемом в камере, около $1 \cdot 10^{-2}$ - $2 \cdot 10^{-2}$ Па в течение 15 мин – 2,5 ч. При этом на криопанели будет сконденсировано соответственно около 10^2 – 10^3 м³·Па газа с образованием слоя конденсата – криосорбента толщиной порядка 10^4 – 10^5 монослоев. При конденсации такого количества аргона расходуется около 0,13 -1,3 л жидкого гелия соответственно.

После напуска газа-криосорбента для получения предельного давления в камере, равного 10^{-10} Па и ниже, достаточно прогреть ее стенки, технологическую оснастку, фланцы 18 и 20 при температуре 200-250 °С в течение 4-8 ч, не превышая давления при подъеме температуры выше $1 \cdot 10^{-4}$ Па. Корпус крионасоса прогревать нет необходимости, поскольку, как видно из рис. 46, конструктивно он выполнен так, чтобы газовыделение с его внутренней поверхности, а также десорбируемые газы с резинового уплотнения 24, фланцев 23, 25 и наружной поверхности патрубка 21, мигрируя по зазору между узлами 1, 7, 10, 5 каналу 9, через шевронный экран 8, конденсируются в основном на крышке сосуда 2 и не попадают в охватываемую зону откачки и рабочую камеру.

ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Течеискатель искровой И043.009

Одним из важнейших условий получения и сохранения заданной среды в рабочих объемах различных систем и изделий является герметичность их конструкций. В вакуумной технике герметизация осуществляется ради получения и сохранения необходимого вакуума, в приборостроении – для защиты рабочих элементов от вредных воздействий окружающей среды или предупреждения замещения газа – заполнителя воздухом. Контроль герметичности относится к числу испытаний, необходимых для того, чтобы обеспечить нормальное функционирование герметизированных объектов, например измерительных ячеек с жидкометаллическими расплавами, поверхностные свойства которых изучаются в КБГУ и ЧГУ.

Под герметичностью понимают непроницаемость конструкции для газов или жидкостей. Абсолютная герметичность недостижима и неконтролируема. Поэтому герметичным принято считать конструкции, газовый или жидкостный обмен через элементы которых достаточно мал для того, чтобы не мешать нормальному ходу рабочего процесса или сохранения требуемых характеристик герметизированного изделия в процессе всего срока его службы.

Все способы течеискания базируются на регистрации проникающих через течи веществ. В большинстве случаев это специально подобранное пробное вещество (ПВ) – пробный газ (ПГ) или пробная жидкость (ПЖ), которое может быть избирательно обнаружено выбранным методом течеискания.

Искровой течеискатель И043.009 (рис. 54) представляет собой простейший переносной прибор, предназначенный для оценки степени разрежения и отыскания мест течей в стеклянных вакуумных системах, а также в металлических откачиваемых системах при наличии в них стеклянных деталей. Течеискатель состоит из блока питания и зонда со стержневым электродом.



Рис. 54. Искровой течеискатель ИО43.009

Действие течеискателя основано на возбуждении безэлектродного ВЧ – высокочастотного разряда в объеме при давлении $5 \cdot 10^{-1} - 50$ Па. Цвет разряда зависит от степени достигнутого разряжения и рода газов, содержащихся в объеме или проникающих в него через течь. Место течи в стеклянной оболочке можно обнаружить при перемещении вдоль нее зонда. Приближение к течи сопровождается формированием рассеянного пучка искр в тонкий ярко-белый пучок, направленный с острия электрода точно на место течи. Течи в шлифовых и других соединениях так же, как и в металлических частях системы, могут быть обнаружены по изменению цвета при проникновении сквозь течь ПВ (ацетона, спирта, углекислого газа и т.п.). Разряд возбуждается прикосновением электрода к стеклу или, лучше, к металлическому вводу, впаянному в стекло. Участки поверхности, подозреваемые в натекании, смачиваются или обдуваются ПВ.



Рис. 55. Место течи (белое светящее пятно) в стеклянной оболочке измерительной ячейки, обнаруженное искровым течеискателем И043.009

В случае его проникновения через течь лилово-красное свечение, характерное для воздуха, меняется в голубовато-серое, рис. 55.

Основные характеристики течеискателя И043.009:

Максимальная длина искры.....	20 мм
Видимое сечение в диапазоне давлений.....	0,5-50 Па
Потребляемая мощность.....	60 Вт
Габаритные размеры (мм) блока питания.....	250x210x200
Высокочастотного трансформатора (длина x диаметр, мм).....	217x37
Общая масса.....	5 кг

Приложение 10. Краткие сведения из истории развития отечественной вакуумной техники

Мировая история вакуумной техники берет свое начало в 1642 г. с известных опытов Отто фон Герике с Магдебургскими полушариями, для откачки воздуха из которых он использовал обычный пожарный насос, герметизированный с помощью помещения в водяную ванну. С тех пор средства получения вакуума прошли длительный путь развития вплоть до создания современных промышленных образцов, основанных на различных принципах действия, и охватывающих широкий диапазон создаваемых давлений от атмосферного до 10^{-11} Па и ниже.

Отечественную историю развития средств откачки можно условно разбить на три периода:

Первый период – период становления, охватывающий промежуток времени до второй мировой войны, связанный с использованием вакуума в научных исследованиях, с появлением и развитием отечественной электровакуумной промышленности: производством ламп накаливания, радиоэлектронных ламп, рентгеновских трубок и т.д.

До начала 30-х годов двадцатого столетия основными средствами получения вакуума в стране были ртутные насосы Тендера и Ленгмюра, изготавливавшиеся в стеклодувных мастерских лабораторий и заводов, а также насосы, покупавшиеся за рубежом.

В 1912 г. профессором Петербургского университета Боровиком был изобретен диффузионный парортутный насос. С середины 30-х годов до начала второй мировой войны в Харьковском физико-техническом институте были проведены работы по созданию первого отечественного вакуумного масла с низкой упругостью пара 10^{-3} Па и первых отечественных паромасляных диффузионных насосов.

Второй период – период становления и стремительного развития откачной вакуумной техники, охватывающий промежуток времени с 1945 г. до середины 60-х годов. Этот период был связан с научно-технической революцией, вызванной развитием военной техники и распространившейся на все области промышленности, техники и науки. Именно в этот период была заложена научная, техническая и промышленная база откачной вакуумной техники.

Третий период – начинается с середины 60-х годов и про-

должается до настоящего времени.

1945–1947 гг. Основной потребитель вакуумной техники, как и в довоенные годы – электровакуумная промышленность. В 1945 г. была организована Центральная вакуумная лаборатория (ЦВЛ), которая возглавлялась будущим академиком С.А. Векшинским. Для нужд электровакуумного производства создаются первые промышленные отечественные вакуумные насосы: форвакуумные ВН-494, ВН-46I и РВН-20, диффузионный ЦВЛ-100 с быстротой действия 100 л/с. Разрабатываются специальные вакуумные масла для насосов: вазелиновое ВМ-4 для механических насосов, вазелиновое Д1, октойли ОФ и ОС для диффузионных насосов.

1947–1950 гг. Бурный рост работ в области атомной техники, организация производства атомного горючего потребовали создания целого комплекса вакуумного оборудования, качественно и количественно совершенно не похожего на то, что имелось в стране до этого. В 1947 г. для этой цели на базе ЦВЛ организован Научно-исследовательский вакуумный институт (НИВИ), ныне НИИВТ им. С.А. Векшинского. В этот период создается диффузионный насос Н-20Т с быстротой действия 20000 л/с – один из крупнейших по тем временам насос в мире, который еще долгие годы после его создания оставался уникальным по производительности насосом. Разрабатывается первый промышленный образец паромасляного бустер-насоса с быстротой действия 500 л/с БН-3 и создается специальное бустерное масло – масло «Г». На базе этих насосов создается первый в стране высоковакуумный откачной агрегат Н-205. Уже в те далекие годы были разработаны многие элементы оборудования, явившиеся прообразами современных конструкций вакуумной техники: азотные и фреоновые ловушки, вакуумные запорные вентили, натекатели, сорбционные насосы для откачки хлора - хлоропоглотители. Уже тогда были опробованы первые конструкции внутренних нагревателей в паромасляных насосах. В содружестве с работниками КБ Московского завода им. В.И. Ленина разрабатываются крупные по тем временам механические насосы ВН-2, ВН-I ж ВН-4 с быстротами откачки от 6 до 50 л/с. Знаменательным событием того периода, сыгравшим решающее значение для всего последующего развития вакуумной техники, явилась организация промышленного производства откачного вакуумного оборудования на заводе им. В.И. Ленина. В Харьковском Физико-Техническом институте продолжают работы по наследованию и совершен-

ствованию диффузионных насосов. Разрабатываются насосы М-20 и М-4 с быстротами действия 20000 и 40000 л/с. И.М. Лившицем и Л.Н. Розенцвейгом предлагается приближенная теория диффузионного насоса.

1951–1956 гг. Потребность в вакуумном откачном оборудовании возрастает. Появляются новые требования к нему. Возникает необходимость откачивать конденсируемые пары и парогазовые смеси, приведшая к разработке газобалластных устройств к насосам ВН-1, ВН-2, ВН-4, ВН-6. Разработанные устройства позволили обеспечить удовлетворительную откачку паров воды при впускном давлении 10^{-3} Па форвакуумными насосами с быстротами действия от 6 до 150 л/с. Разрабатывается первая унифицированная серия высоковакуумных паромасляных насосов Н-1С, Н-5С, Н-5Т, Н-8Т с быстротами действия от 100 до 8000 л/с. Рабочий диапазон создаваемых давлений 10^{-4} – 10^{-2} Па, наибольшее выпускное давление 1 па. На базе насосов создается серия высоковакуумных агрегатов ВА-01-1; ВА-0,5-1; ВА-2-3; ВА-5-4; ВА-8-4, оснащенных азотными ловушками и затворами. Создание унифицированной серии высоковакуумных паромасляных насосов и агрегатов и серии газобалластных форвакуумных насосов различной производительности явилось важной вехой в дальнейшем внедрении вакуума в различные технологические процессы приборо- и аппаратостроения: в качественную металлургию, электронику, нефтехимию, масс-спектрометрию, ускорительную технику и др.

Развитие ускорительной техники и техники получения редких и активных газов стимулирует начало работ по созданию парортутных насосов и агрегатов. Создаются насосы Н-5Р, Н-40Р, Н-1ТР с быстротами действия от 5 до 1000 л/с, уникальный насос с выхлопом в атмосферу ЭПРН-760, не имеющий и до сего времени аналогов за рубежом.

Разрабатываются герметичные механические насосы НВГ-1, НВГ-2, НВГ-3 для откачки редких и радиоактивных газов.

Развитие производства вакуумного оборудования и необходимость его расширения приводит к передаче производства вакуумной техники с завода им. Владимира Ильича на Московский 3-д «Компрессор».

В **1950–51 гг.** Б.Г. Лазаревым и Е.С. Боровиком в ХФТИ выполнены первые работы по исследованию процесса криосорбционной откачки и разработан первый заливной криосорбционный гелиевый

насос ВК-4. В 1954 г. В.И. Скобелкиным и Н.И. Юценковой предложена теория диффузионного насоса, учитывающая реальный механизм работы насоса.

1957–1959 гг. Развитие производства качественных сталей и тугоплавких металлов в вакуумных дуговых и индукционных печах выдвигает задачу создания высокопроизводительных насосов, работающих в области давлений $1\text{--}10^{-2}$ Па. Для этой цели разрабатываются паромасляные бустер-насосы БН-1500, БН-1500-2, БН-4500 и БН-15000 с быстротами действия от 1500 до 15000 л/с, с диапазоном рабочих давлений $10\text{--}10^{-2}$ Па. Необходимость откачки больших количеств воздуха выдвигает задачу создания для бустер-насосов термоокислительно стойких рабочих жидкостей. Разрабатываются стойкое нефтяное масло ВМ-3 и кремнийорганическая жидкость ПФМС-1.

Наряду с паромасляными насосами разрабатываются механические бустер-насосы на основе конструкции двухроторных воздуховок Рутса -насосы ДВН-500 и ДВН-1500. Производство насосов организуется на Мелитопольском компрессорном заводе.

Дальнейшее развитие электровакуумного производства, потребность в небольших широкодиапазонных высоковакуумных насосах приводит к созданию диффузионных насосов Н-005 и НВО-40. Насос С.Н-005 совмещал в себе свойства высоковакуумного и бустерного насосов, работая в области давлений $10^{-4}\text{--}10$ Па и обладая высоким значением наибольшего выпускного давления - 4 мм рт. ст. Эти характеристики наряду с высокой термоокислительной стойкостью разработанных для него кремнийорганических жидкостей ПФМС-2 и ВКЖ-94 делали его удобным для оснащения автоматов откачки электровакуумных приборов. Насос НВО-40 с воздушным охлаждением предназначался для оснащения подвижных линий откачки электровакуумных приборов. Им были оснащены также гелиевые течеискатели ПТИ.

Расширение работ в области ускорительной техники и начало работ в области управляемых термоядерных реакций потребовало создания высокопроизводительных парортутных насосов и сверхвысоковакуумных агрегатов на их основе. Были разработаны насосы Н-5СР, Н-6ТР с быстротами действия 500 и 6000 л/с, агрегаты РВА-05-1, ВА-2-1, РВА-6-1, РВА-05-2, с предельным вакуумом 10^{-4} Па и прогреваемые агрегаты РВА-0,54 и РВА-1-3 с предельным вакуумом 10^{-8} Па. На агрегате РВА-0,5-4 в результате специальных

исследований и разработанных мероприятий удалось получить предельный вакуум 10^{-11} Па, наиболее низкий из когда-либо достигнутых для пароструйных насосов. Разрабатываются сверхвысоковакуумные прогреваемые паромасляные насосы ВА-05-5 и ВА-8-9М на базе насосов Н-5С и Н-8Т с предельным вакуумом $5 \cdot 10^{-7}$ Па.

Были разработаны новые средства откачки:

- форвакуумные механические насосы с масляным уплотнением, предназначенные для откачки агрессивных газов, установки для очистки масла в насосах;
- агрегат в химически-стойком исполнении на базе двухроторного и форвакуумного насоса;
- диффузионные насосы с воздушным охлаждением, укороченные серии диффузионных насосов;
- турбомолекулярные насосы на шарикоподшипниковых опорах с циркуляцией смазывающего масла, с консистентной смазкой подшипников и с магнитными опорами ротора;
- криогенные насосы заливные и с газовыми микрокриогенераторами;
- магниторазрядные и испарительные геттерно-ионные насосы, комбинированные магниторазрядные насосы, в том числе уникальные микронасосы магниторазрядные и геттерно-ионные, предназначенные для встраивания в ЭВП.

Разработан целый ряд рабочих жидкостей для вакуумных насосов: минеральных и синтетических, в том числе химостойких для диффузионных и механических насосов, сверхвысоковакуумных для диффузионных насосов, специальных жидкостей для турбомолекулярных насосов.

Значительное развитие получила вакуумметрическая и теческательная техника. Разработаны и освоены в производстве мембрано-емкостные вакуумметры ВД-1 и ВД-2, измерения которых не зависят от рода контролируемого газа, тепловые, ионизационные и магнито-разрядные вакуумметры и преобразователи давления, в том числе:

- терморезисторный, блокировочный вакуумметр 13 ВТВ-003; образцовый тепловой ВТСО-1 с малой погрешностью измерения $\pm 10\%$; ионизационные блокировочные вакуумметры ВИЦБ-2/7-002 и ВИЦБ-11 с цифровым отсчетом давления;
- сверхвысоковакуумный ионизационный вакуумметр ВИЦ 9/0-001 с цифровым отсчетом давления, образцовый ионизационный ваку-

умметр ВИО-1 с погрешностью измерений менее 10%;

- магниторазрядные блокировочные вакуумметры ВМБ-12, ВМБ-14, ВМБЦ-12, ВМБ-11 с цифровым отсчетом давления, предназначенные для работы в автоматизированных системах, уникальные, не имеющие аналогов за рубежом, самоочищающиеся преобразователи давления ПММ-28, ПММ-38, вакуумметр-течеискатель ВТИ-1 и др.

Революционные изменения произошли и в течеискательной технике. Были разработаны и освоены в производстве малогабаритные гелиевые масс-спектрометрические течеискатели ТИ1-14 и ТИ1-15, высокочувствительный течеискательный стенд СВТ-2, усовершенствованные галогенные течеискатели БГТИ-7 и ТИ-2-8, принципиально новые электронно-захватные течеискатели 13ТЭ-9-001 и ТИЭ-2.

Содержание

Введение.....	4
Указания мер по технике безопасности.....	5
1. Теоретическое введение.....	5
1.1. Некоторые понятия и определения.....	5
1.2. Три основных режима течения газа.....	7
1.2.1. Вязкостный режим течения газа.....	8
1.2.2. Молекулярный режим течения газа.....	9
1.2.3. Молекулярно-вязкостной режим течения газа	10
2. Основные методы и техника измерения вакуума.....	11
2.1. Жидкостные манометры	11
2.2. U- образные манометры.....	12
2.3. Компрессионный манометр Мак-Леода.....	15
2.4. Термoeлектрические манометры-преобразователи.....	18
2.5. Ионизационные манометры преобразователи	22
2.6. Манометры для измерения сверхвысокого вакуума.....	25
3. Основные методы и техника получения вакуума.....	27
3.1. Общие требования к вакууму.....	27
3.2 Основные параметры вакуумных насосов.....	28
3.3. Основное уравнение вакуумной техники	29
3.4. Механические вращательные насосы.....	31
3.4.1. Пластинчато – статорные вакуумные насосы.....	34
3.4.2. Пластинчато – роторные вакуумные насосы	34
3.4.3. Золотниковые вакуумные насосы.....	36
3.5. Цеолитовый вакуумный насос (агрегат) ЦВА-1-2.....	38
3.6. Пароструйные (диффузионные) вакуумные насосы.....	43
3.7. Вакуумная техника для получения сверхвысокого вакуума.....	49
3.7.1. Турбомолекулярные вакуумные насосы.....	51
3.7.2. Геттерно-ионные вакуумные насосы.....	56
3.7.3. Магнитно-разрядные вакуумные насосы.....	57
3.7.4. Криогенные вакуумные насосы	58
3.7.5. Спиральные вакуумные насосы.....	60
3.8. Вымораживающие ловушки и хладагенты.....	69
4. Лабораторные работы.....	71
4.1. Методические указания по подготовке, выполнению и защите лабораторных работ.....	71
4.2. Получение и измерение низкого, среднего, высокого и сверх-высокого вакуума.....	73

Контрольные вопросы	79
Список литературы.....	83
Приложение 1. Марки вакуумных масел и рекомендации по их применению	
а) Марки вакуумных масел.....	86
б) Требования к вакуумным маслам и рекомендации по их применению.	88
в) Технические характеристики паромасляных насосов.....	90
Приложение 2. Составы остаточных газов в рабочей камере при ее откачке вакуумными насосами:	
а) без наличия ионной ловушки.....	92
б) с ионной ловушкой.....	92
в) спектр масс остаточных газов в вакуумной установке при откачке паромасляным насосом.....	93
г) составы остаточных газов в вакуумной установке при откачке геттерно-ионным насосом ГИН – 05М.....	94
д) спектр остаточных газов в рабочей камере при откачке ее турбомолекулярным насосом.....	94
Приложение 3. Вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ – 2..	95
Приложение 4. Вакуумметр ВИ – 14.....	99
Приложение 5. Форвакуумный насос ЗНВР-1.....	115
Приложение 6. Сверхвысоковакуумный насос НМД-016М.....	120
Приложение 7. Магниторазрядный триодный насос ТРИОН–150 (НМТО -0,1-1.).....	124
Приложение 8. Сверхвысоковакуумный гелиевый заливной криогенный насос	130
Приложение 9. Течеискатель искровой И043.009.....	137
Приложение 10. Краткие сведения из истории развития отечественной вакуумной техники.....	141

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Алчагиров Борис Батокович
Гонов Султан Жамалдинович
Дадашев Райком Хасимханович
Калажоков Хамидби Хажисмелович
Дышекова Фатима Феликсовна

ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА

Подписано в печать 25.02.2016 г. Формат 60х90 1/6
У.п.л. 4.50. Бумага офисная. Печать-ризография.
Тираж 100 экз.

Издательство ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет»
Адрес: 364037 ЧР, г. Грозный,
ул. Киевская, 33.