

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет  
Кафедра общей физики

О.А. Брагин, В.Ж. Мадирбаев

Лабораторная работа 1.4  
Знакомство с методами получения и измерения вакуума  
Методические указания по выполнению лабораторной работы

Новосибирск  
2016

Брагин О.А., Мадирбаев В.Ж.

Лабораторная работа 1.4. Знакомство с методами получения и измерения вакуума. Методические указания по выполнению лабораторной работы/ Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2015 – 28 с.

Развитие практически всех отраслей науки и техники тесно связано с использованием вакуумной техники. Знакомство с элементами вакуумной техники необходимо студентам–физикам любой специализации. Целью лабораторной работы является ознакомление студентов с основными принципами вакуумной техники, с приборами, применяющимися в вакуумной технике и их характеристиками. По окончании выполнения лабораторной работы, студент должен уметь оценивать технические возможности вакуумных установок.

В методическом указании изложены лишь физические основы применяемых приборов, детальное описание имеется в рекомендованной литературе.

Задача студента в лаборатории молекулярной физики – научиться самостоятельно работать с вакуумными установками масляной и безмасляной откачки, уметь измерять вакуум современными вакуумметрами. Условия проведения лабораторных работ максимально приближены к обстановке современных физических лабораторий.

Методическое указание к лабораторной работе предназначено для студентов 1-го курса физического факультета НГУ.

Методические указания по выполнению лабораторной работы подготовлены в рамках реализации Программы развития НИУ на 2009 – 2018 гг.

© Новосибирский государственный  
университет, 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1</b>	<b>ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>ПРОЦЕССЫ ОТКАЧКИ .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>ТЕХНИКА ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА .....</b>	<b>9</b>
3.1	ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС (МЕХАНИЧЕСКИЙ ВАКУУМНЫЙ НАСОС С МАСЛЯНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ) .....	11
3.2	СПИРАЛЬНЫЙ ФОРВАКУУМНЫЙ НАСОС (SCROLLVAC) .....	13
3.3	ДИФфуЗИОННЫЙ НАСОС .....	13
3.4	ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ НАСОС .....	16
<b>4</b>	<b>ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ РАЗРЯЖЕННЫХ ГАЗОВ (ВАКУУММЕТРЫ) .....</b>	<b>17</b>
4.1	МАНОМЕТРИЧЕСКИЙ ТЕРМОПАРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ .....	18
4.2	ЭЛЕКТРОННЫЙ ИОНИЗАЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ .....	20
4.3	ДАТЧИК ВАКУУМА ПИРАНИ .....	22
4.4	ДАТЧИК ВАКУУМА ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ .....	22
4.5	ИНВЕРСНО-МАГНЕТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ .....	22
<b>5</b>	<b>ОПИСАНИЕ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ И ПОРЯДОК РАБОТЫ .....</b>	<b>23</b>
	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>28</b>

**Цель работы:** изучение некоторых элементов вакуумной техники, принципов получения и измерения вакуума.

**Оборудование:**

- вакуумная установка, состоящая из форвакуумного и диффузионного насосов, трубопроводов, рабочего объема, термомпарных и ионизационных вакуумметров, регистратора показаний вакуумметров.
- вакуумная установка, состоящая из спирального форвакуумного и турбомолекулярного вакуумного насосов, трубопроводов, рабочего объема, вакуумметров полного диапазона, регистраторов на базе ЭВМ.

## 1 Общие сведения. Теоретические основы

Вакуумом (от лат. *vacuum* – пустота) называют состояние газа или пара при давлении ниже атмосферного. Количественной характеристикой вакуума служит абсолютное давление. Основной единицей измерения давления в системе СИ служит Паскаль ( $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ ). В практике вакуумных измерений широко используется другая внесистемная единица – миллиметр ртутного столба ( $1 \text{ мм рт.ст.} = 133 \text{ Н/м}^2$ ).

Интенсивность протекания физико-химических процессов в вакууме зависит от соотношения между числом столкновений молекул газа со стенками ограничивающего его сосуда и числом взаимных столкновений молекул, характеризующимся отношением средней длины свободного пробега  $\bar{\lambda}$  к характерному (определяющему) линейному размеру сосуда. Это отношение называется числом Кнудсена  $K_n$  и оно положено в основу условного разделения областей вакуума на следующие диапазоны: низкий, средний, высокий и сверхвысокий.

Низкий вакуум характеризуется давлением газа при котором средняя длина свободного пробега молекул газа значительно меньше характерного линейного размера сосуда  $\bar{\lambda} \ll L$ .

Низкому вакууму обычно соответствует область давлений  $760 \div 1 \text{ мм рт.ст.}$

Средний вакуум характеризуется давлением газа, при котором средняя длина свободного пробега соизмерима с линейным размером сосуда ( $\lambda \approx L$ ). Область давлений  $1 \div 10^{-3}$  мм рт. ст.

Высокий вакуум средняя длина свободного пробега много больше линейных размеров ( $\lambda \gg L$ ). Область давлений  $10^{-3} \div 10^{-7}$  мм рт. ст.).

Сверхвысокий вакуум характеризуется давлением газа, при котором не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от адсорбированного газа, за время, существенное для рабочего процесса. Обычно этому соответствует область давлений меньше  $10^{-7}$  мм рт. ст.

Теоретический расчет средней длины свободного пробега молекул газа определяется по формуле

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n},$$

где  $\sigma$  – эффективный диаметр молекул, а  $n$  – концентрация. Как видно из этой формулы, при постоянной температуре для определенного газа произведение  $P \cdot \lambda = \text{const} = \lambda'$  ( $P = nkT$ ), где  $P$  – давление,  $n$  – концентрация молекул газа,  $T$  – температура,  $\lambda'$  – средняя длина свободного пути молекул при давлении 1 мм рт. ст. Для воздуха при температуре 298 К  $\bar{\lambda} = 4,6 \cdot 10^{-3}$  см. Из этого следует простая зависимость для оценки длины свободного пробега для различных давлений:

$$\lambda(\text{см}) = \frac{4,6 \cdot 10^{-3}}{P(\text{мм.рт.ст.})}.$$

## 2 Процессы откачки

Течение газа в вакуумной системе зависит от ряда параметров: температуры газа и стенок на концах системы, абсолютного давления, внутреннего трения в газе и взаимодействия газа с поверхностью, а также от формы и размеров рассматриваемой системы. Различают три основных вида течения газа: *турбулентное* или *вихревое*, *ламинарное* или *вязкостное* и *молекулярное* или *свободномолекулярное*.

кулярное. Четкой границы между этими течениями нет – существуют промежуточные области переходных течений.

При вязкостном режиме течения газа средняя длина свободного пробега молекул  $\bar{\lambda}$  много меньше характерного размера емкости (например, для трубопровода таким размером является его диаметр  $D$ ). При молекулярном и переходном режимах течения газа средняя длина свободного пробега больше характерного размера или сравнима с ним. Области течения дифференцируют числом Кнудсена  $K_n = \bar{\lambda}/D$ . Молекулярному течению соответствует  $K_n > 1/3$ , вязкостному  $K_n < 10^{-2}$ .

Введем основные определения вакуумной техники.

1. *Быстротой откачки сосуда* или эффективной быстротой откачки  $S_0$  называется объем газа, поступающий в единицу времени из сосуда в трубопровод при данном давлении  $P$  в откачиваемом сосуде.
2. *Быстротой откачивающего действия* или, короче, *быстротой действия* вакуумного насоса  $S_n$  при данном впускном давлении  $P_n$  называется объем газа, поступающий в работающий насос в единицу времени при этом давлении.

По определению

$$S'_n = \frac{dV_n}{dt}.$$

3. Количество газа  $Q'_i$ , протекающего в единицу времени в любом сечении трубопровода, называется *потоком газа* и определяется как произведение давления  $P_i$  на объем газа проходящего через это сечение в единицу времени  $S_i$ .

$$Q'_i = P_i S_i.$$

4. Поток газа, протекающего во входном сечении вакуумного насоса  $Q'_n$ , называется *производительностью насоса при данном впускном давлении*  $P_n$

$$Q'_n = P_n S_n.$$

5. *Проводимостью элемента вакуумной системы* называется отношение потока газа, проходящего через элемент вакуумной системы, к разности давлений в концевых сечениях.

$$U = \frac{Q'}{P_0 - P_n}$$

6. *Сопротивлением трубопровода* называется величина  $W$ , обратная проводимости

$$W = \frac{1}{U} = \frac{P_0 - P_n}{Q'}$$

Сопротивление сложных вакуумных систем рассчитывается по аналогии с электрическими цепями (параллельное и последовательное соединение сопротивлений).

Быстроту откачки объекта  $S_0$  объемом  $V_0$  при давлении  $P_0$  определяют по скорости действия насоса  $S_n$  и проводимости  $U$  трубопровода при условии постоянства потока  $Q = const$ . Из условия

$$Q' = S_0 P_0 = U(P_0 - P_n) = S_n P_n = const$$

следует

$$S_0^{-1} = U^{-1} + S_n^{-1}$$

или

$$S_0' = \frac{U \cdot S_n}{U + S_n}$$

Это уравнение представляет собой основное уравнение вакуумной техники, которое выражает отличие быстроты откачки объекта  $S_0$  от быстроты откачки насоса  $S_n$  при наличии трубопровода проводимостью  $U$ .

Для определения длительности откачки будем считать, что процесс квазистационарен (т.е. разница давлений на концах трубопровода мала по сравнению со средним давлением в нем, объем трубопровода значительно меньше объема сосуда и в трубопроводе существует только один режим течения, а скорость откачки достаточ-

но медленная и температура газа постоянна и равна температуре стенок). Тогда за время  $dt$  из сосуда объемом  $V$  удаляется количество газа  $S_0' p dt$ . За это же время в объем за счет газовыделения и натекания поступает с постоянной скоростью количество газа, равное  $Q_\Sigma' dt$ .  $Q_\Sigma'$ , – суммарный поток частиц газа, поступающего в сосуд за счет газовыделения и натекания. Изменение количества газа в сосуде за время  $dt$  составит  $V dp$ , где  $V$  – объем сосуда.

Уравнение баланса:

$$V dp = Q_\Sigma' dt - S_0' p dt$$

Разделяя переменные

$$dt = \frac{dp}{Q_\Sigma' / V - S_0' p / V},$$

Считая, что  $Q_\Sigma'$  и  $S_0'$  не зависят от давления

$$t = \ln \frac{P_{нач} - Q_\Sigma' / S_0'}{P - Q_\Sigma' / S_0'}$$

или

$$P(t) = P_{нач} \cdot e^{\left( \frac{Q_\Sigma'}{V} - \frac{S_0' \cdot t}{V} \right)},$$

где  $P_{нач}$  – начальное давление в сосуде до начала откачки.

Отсюда следует, что предельно достигаемый вакуум сосуда определяется не длительностью откачки, а потоком газа, натекающего в объем, и скоростью откачки

$$P_{ост} = Q_\Sigma' / S_0'.$$

Таким образом, газовыделение является одной из важнейших характеристик вакуумной техники. Оно зависит как от самого материала, так и от технологической обработки поверхности. Для большинства параметров скорость газовыделения зависит от температу-



ры поверхности и увеличивается при возрастании температуры, поэтому эффективным приемом снижения газовой выделения является высокотемпературный прогрев всех элементов вакуумной системы в течение нескольких часов и непрерывной откачкой.

При разработке вакуумных объемов и трубопроводов необходимо учитывать, что многие материалы при понижении давления начинают довольно интенсивно испаряться сами и выделять абсорбированные газы. Кроме того, происходит диффузия газов, особенно гелия и водорода сквозь материалы стенок вакуумных объемов. Если для низковакуумных установок эти факторы незначительны, то в высоковакуумных устройствах этим вопросам приходится уделять самое пристальное внимание. Наиболее распространенные вакуумные материалы: стекло (кварц), нержавеющая сталь, медь, алюминий. Неразъемные соединения элементов вакуумных систем обычно соединяют электродуговой сваркой в среде аргона или пайкой припоями на основе серебра.

Разъемные соединения (фланцы трубопроводов, смотровые окна и т.д.) герметизируются с помощью прокладок. Для низкого и среднего вакуума в качестве прокладок используются специальные сорта резины, полиэтилен, фторопласт и др. В сверхвысоковакуумной конструкции – металлические уплотнения из свинца, индия, алюминия, меди, золота.

### **3 Техника получения вакуума**

Устройства, служащие для создания вакуума, называются вакуумными насосами.

Промышленные вакуумные насосы работают в области давлений от  $10^5$  до  $10^{-10}$  Па. При большом различии в принципах действия и конструкциях, обусловленном многообразием требований к откачному оборудованию, во всех вакуумных насосах для откачки газа используется один из двух способов:

а) перемещение газа за счет приложения к нему механических сил в некотором месте вакуумной системы, откуда газ выталкивается;

б) связывание газа путем сорбции, химических реакций или конденсации обычно в замкнутой вакуумной системе.

По принципу действия промышленные вакуумные насосы, используемые для получения давлений меньше  $10^2$  Па, разделяют на следующие группы.

1. *Насосы объемного действия*, в которых перемещение газа осуществляется путем периодического изменения объема рабочей камеры.

2. *Эжекторные насосы*, в которых происходит турбулентно-вязкостное увлечение газа струей рабочей жидкости или пара.

3. *Молекулярные насосы*, которые осуществляют откачку путем сообщения молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости в определенном направлении. Насосы этой группы могут быть *струйными* и *молекулярными*. Действие струйных насосов основано на сообщении молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости непрерывно истекающей струей пара. Действие молекулярных насосов основано на механическом способе передачи молекулам газа дополнительной скорости движущимися поверхностями твердого тела.

4. *Сорбционные насосы*, которые осуществляют откачку газов путем их сорбции на поверхности или в объеме твердых тел. В эту группу входят и адсорбционные насосы, в которых откачка происходит вследствие обратимой физической адсорбции газа при низкой температуре.

5. *Криогенные насосы*, которые осуществляют откачку путем конденсации откачиваемых газов и паров на поверхностях, охлаждаемых до сверхнизких (криогенных) температур. Разновидностями криогенных насосов являются конденсационные и криосорбционные насосы.

В названиях насосов не всегда отражается принцип действия, но очень часто отмечают их конструктивное устройство, используемый материал сорбента (геттера), рабочая жидкость и т.п. Необходимо отметить, что к механическим насосам, откачивающее действие которых достигается за счет механического движения деталей, принято относить все объемные и турбомолекулярные насосы, хотя они различаются как по принципу действия, так и по области применения.

Для улучшения рабочих характеристик применяют насосы с комбинированным принципом действия. Наиболее часто применяемая комбинация – пароструйный насос с азотной ловушкой. Это

связано с тем, что диффузионный насос дает в откачиваемый объем довольно много паров масла, которое является рабочей жидкостью насоса. Для уменьшения обратного потока паров масла на входе диффузионного насоса устанавливается так называемая ловушка, которая в простейшем случае представляет собой жалюзийную конструкцию, охлаждаемую жидком азотом. Благодаря конденсации паров масла на азотной ловушке резко уменьшается обратный поток этих паров. Применение азотной ловушки позволяет на порядок улучшить вакуум.

В лабораторной работе используются две вакуумных установки:

- В первом варианте применяются пластинчато-статорный форвакуумный насос, создающий предварительное разрежение и диффузионный (пароструйный) насос, создающий высокий вакуум.
- Во втором варианте используются спиральный форвакуумный и турбомолекулярный насосы безмасляной откачки.

### **3.1 Форвакуумный насос (механический вакуумный насос с масляным уплотнением)**

Схема пластинчато-статорного насоса приведена на рис. 1. В пазе корпуса 1 возвратно-поступательным образом движется пластина 3, которая прижимается к ротору 2 рычажным механизмом 5 и делит серпообразную полость между корпусом 1 и ротором 2 на две рабочие ячейки. Газ всасывается через входной патрубок 4, который перекрывается ротором. Когда входной патрубок открыт, газ входит в рабочую ячейку приблизительно в течение одного оборота ротора. При отделении входного патрубка от рабочей ячейки в ней происходит сжатие газа. Когда разность давлений в рабочей ячейке и выхлопном патрубке превышает давление в клапане 6, последний открывается и газ вытесняется в выхлопной патрубок.

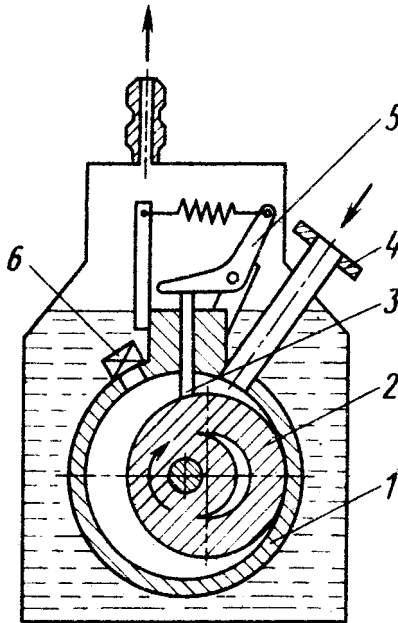


Рис. 1. Схема пластинчато-статорного насоса.

Характерная особенность пластинчато-статорных вакуумных насосов маслonaполненного типа – наличие масла в рабочих полостях, которое заполняет зазоры, исключая перетекания газа через них. Кроме того, клапан работает под заливом масла, что повышает герметичность, практически сводит к нулю мертвые объемы, увеличивает быстроту действия насосов и создаваемый вакуум.

**ВНИМАНИЕ!** После остановки насоса, если не обеспечено равенство давлений во всасывающем и выхлопном патрубках, масло под действием атмосферного давления может выдавливаться в вакуумную систему. Поэтому для предотвращения всасывания масла во впускную коммуникацию необходимо напустить воздух.

Быстрота действия форвакуумного насоса составляет  $1 \div 5$  л/с. Форвакуумные насосы позволяют получить давление до  $10^{-3}$  мм рт. ст.

### 3.2 Спиральный форвакуумный насос (scrollvac)

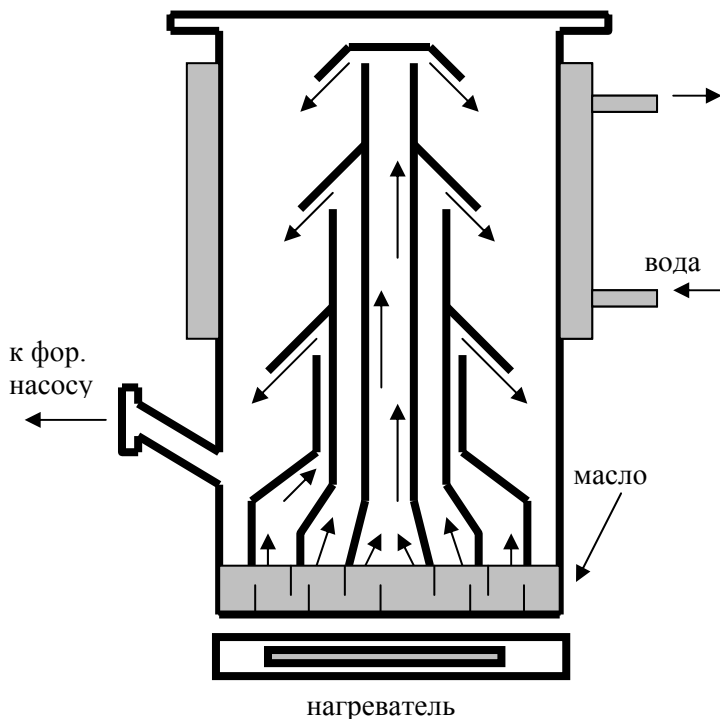
Спиральный форвакуумный насос – это механический насос объемного принципа действия. Откачка происходит за счет периодического изменения объема камеры.

В настоящее время насосы этого типа получили распространение как средство безмасляной откачки. Каждый насос состоит из двух спиралей Архимеда, расположенных со смещением  $180^\circ$ . Таким образом, образуются области с разными объемами. Подвижная спираль, вращаемая электродвигателем, совершает круговое вращение. Образовавшиеся газовые полости уменьшаются, сжимая газ от периферии к центру. В данной лабораторной установке спиральный насос является насосом предварительного разряжения для турбомолекулярного вакуумного насоса.

### 3.3 Диффузионный насос

Диффузионные насосы предназначены для работы в области высокого и сверхвысокого вакуума, т.е. при давлениях  $10^{-3} \div 10^{-7}$  мм рт. ст. и ниже. Диффузионные насосы применяются совместно с механическими вакуумными насосами с масляным уплотнением. Для запуска и нормальной работы насоса необходимо на его выходе создать предварительное разрежение  $10^{-1}$  мм рт. ст., что и обеспечивается форвакуумным насосом.

Схема устройства паромасляного диффузионного насоса, наиболее распространенного в настоящее время, показана на рис. 2. На дне сосуда, обычно металлического, находится испаряющаяся жидкость. Испарение ее обеспечивается электрическими нагревателями. Откачиваемый объем присоединяется к верхнему концу насоса, а его выхлопной патрубок – к входной трубе форвакуумного насоса. После того как форвакуумный насос создал нужное давление в насосе и откачиваемом объеме, включается нагреватель и жидкость интенсивно испаряется. Пар поднимается по трубе, помещенной над жидкостью, с большой скоростью выбрасывается из сопла, которым заканчивается труба, а затем конденсируется на стенках и стекает вниз на дно сосуда. Стенки сосуда окружены «рубашкой», внутри которой протекает вода. Нагреватель и холодильник насоса обеспечивают, таким образом, непрерывную циркуляцию пара.



нагреватель  
Рис. 2. Схема устройства паромасляного диффузионного насоса.

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

Основное значение струи пара сводится к тому, чтобы передать часть своего импульса (количество движения) молекулам откачиваемого газа и направить их вниз к выхлопному патрубку. Давление газа на выхлопе высоковакуумного насоса равно, очевидно, давлению, создаваемому форвакуумным насосом.

Конструкции паромасляных диффузионных насосов имеют ряд особенностей, связанных с использованием в качестве рабочей жидкости масла. Это прежде всего устройства, обеспечивающие фракционирование (т.е. разделение на фракции) неоднородных масел, причем тяжелые фракции (с низким давлением насыщающего пара) направляются в сопло первой (высоковакуумной) ступени, им

обеспечивается низкое предельное остаточное давление и высокое быстродействие насоса в целом, а легкие фракции (с высоким давлением насыщающего пара) направляются в сопло последней ступени, обеспечивая высокое выпускное давление.

Фракционирование масла, стекающего в кипятильник по стенкам корпуса, осуществляется с помощью лабиринтных колец, удлиняющих путь масла до центральной зоны. Легкие фракции успевают испариться на периферии, а более тяжелые – в центре, где они испаряются в сопло первой ступени. Предельное остаточное давление пароструйного диффузионного насоса в значительной мере определяется качеством фракционирования и содержанием газа в масле.

При рабочих давлениях, при которых работает диффузионный насос, длина свободного пробега молекул откачиваемого газа практически всегда больше диаметра впускного отверстия насоса. При тепловом движении молекулы газа направляются к паровой струе. Механизм удаления газа в диффузионных насосах обусловлен диффузионными процессами. Под действием разности концентраций газа над паровой струей и в струе (концентрация газа в струе вблизи сопла пренебрежительно мала) происходит диффузия газа в струю. Попав в струю, молекулы газа получают импульсы от молекул пара в направлении парового потока и уносятся вместе со струей к охлаждаемой стенке корпуса насоса, при этом пар конденсируется, а газ, сжатый в струе до выпускного давления ступени, перетекает вдоль стенки в пространство на следующей ступенью насоса. Наряду с прямой диффузией газа происходит и обратная диффузия, однако при оптимальных режимах работы она несоизмеримо мала, хотя в некоторых случаях, например, при откачке легких газов, существенно влияет на характеристики насоса.

Внимание! При работе с диффузионным насосом следует помнить, что выпуск атмосферного давления в горячий насос приведет к окислению и разложению масла на более легкие фракции, что выведет насос из строя.

Типичная быстрота действия  $S_n$  диффузионного насоса составляет  $10^2 - 10^4$  л/сек.

### 3.4 Турбомолекулярный насос

Принцип работы турбомолекулярного насоса основан на свойствах движения молекул (рис. 3). Механически насос представляет собой движущийся ротор и неподвижный статор. Ротор состоит из системы специальных дисков с лопатками. Тепловое движение молекул неизбежно приводит их к соприкосновению с ротором, при этом они на какое-то время прилипают к нему. Движение ротора придает им дополнительное ускорение и, когда оно превысит определенное значение, молекулы отрываются от ротора по касательной. Таким образом, на входе насоса образуется сильное разрежение, а на выходе – высокое давление. Наибольшей эффективностью обладают турбомолекулярные насосы, статор и ротор которых представляют собой разнонаправленные лопасти с минимальным зазором. Вакуум, создаваемый турбомолекулярными насосами, достигает значений  $10^{-8}$  Па. Подробно работа турбомолекулярных насосов рассмотрена в [1,2].



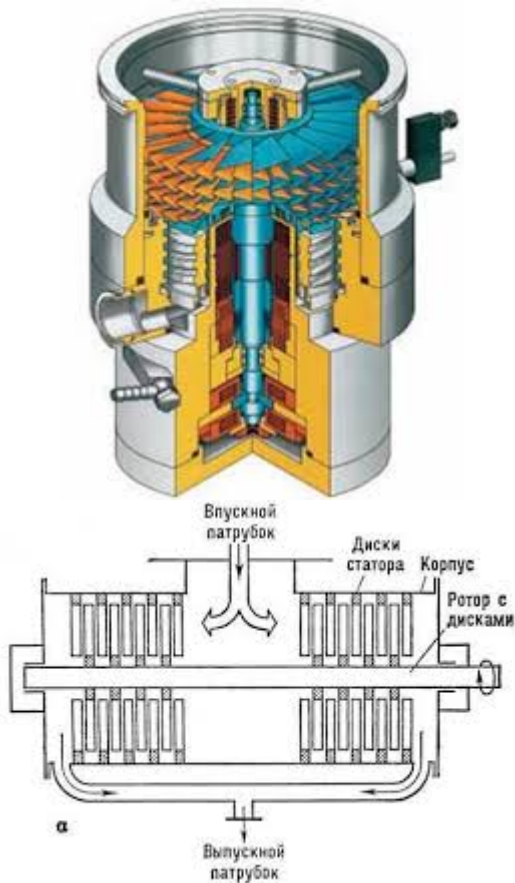


Рис. 3. Устройство турбомолекулярного насоса.

#### 4 Техника измерения давления разряженных газов (вакуумметры)

Само понятие «давление газа» для вакуумной техники утратило свой смысл, так как почти нет таких процессов, которые определялись бы давлением газа, как усилием на единицу поверхности. Гораздо более важными характеристиками газовой среды в вакуумной технике являются *плотность  $\rho$*  или *молекулярная концентрация  $N_1$*  газа. Именно они определяют теплоперенос, сорбционно-десорбционные процессы, воздействие газа на элементы электрон-

ных приборов и другие явления, наблюдаемые в вакууме. Приборы для измерения давления газа ниже атмосферного называются вакуумметрами. Большинство вакуумметров состоит из двух элементов: *манометрического преобразователя* сигнала давления в электрический сигнал и *измерительного блока*.

По принципу действия вакуумметры можно свести в следующие классы.

**Жидкостные**, непосредственно измеряющие давление (U-образные вакуумметры и их модификации).

**Компрессионные**, действие которых основано на законах изотермического сжатия идеального газа (вакуумметр Мак-Леода).

**Деформационные**, использующие в качестве чувствительного элемента сильфон, мембрану и т.п., в которых деформация чувствительного элемента служит мерой давления.

**Тепловые вакуумметры**, использующие зависимость теплопроводности газа от давления. Они подразделяются на термопарные и вакуумметры сопротивления.

**Ионизационные**, в которых используется ионизация газа. Они подразделяются в свою очередь на:

а) электроразрядные, принцип действия которых основан на зависимости параметров электрического разряда в разряженном газе от давления;

б) электронные ионизационные, ионизация газов, в которых осуществляется потоком электронов, ускоряемых электрическим полем.

В данной лабораторной работе используются два типа вакуумметров: термопарный (до давления  $10^{-3}$  мм рт. ст.) и ионизационный для более высокого вакуума.

#### **4.1 Манометрический термопарный преобразователь**

Преобразователь (рис. 4) представляет собой стеклянный или металлический корпус, в котором на двух вводах смонтирован подогреватель, на двух других вводах крепится термопара, изготовленная из хромель-копеля или хромель-алюмеля (специальные сплавы для изготовления термопар). Термопара соединена с подогревателем, который нагревается током, который можно регулировать реостатом и измерять миллиамперметром. Спай термопары,

нагреваемый подогревателем, является источником термо-ЭДС, значение которой показывает милливольтметр.

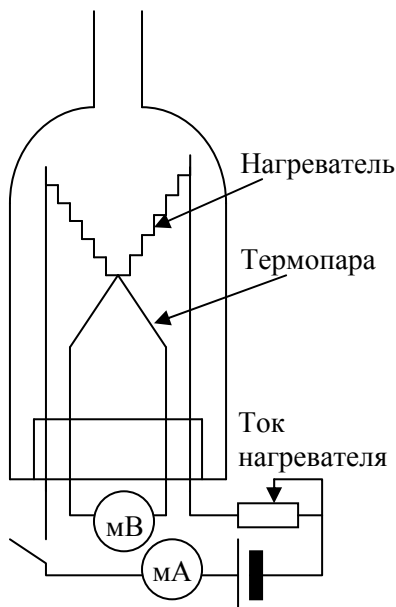


Рис. 4.Схема включения термопарного преобразователя.

При атмосферном давлении, при заданном рабочем токе подогревателя для данной конкретной лампы стрелка вольтметра стоит вблизи нуля. Из курса молекулярной физики известно, что в плотном газе теплопроводность не зависит от давления.

$$\lambda_a = \frac{1}{3} \rho u \bar{\lambda} C_{V_{yo}}$$

$\lambda_a$  – коэффициент теплопроводности;

$\rho$  – плотность газа;

$u$  – скорость молекул;

$\bar{\lambda}$  – средняя длина свободного пробега молекул

$C_{V_{yo}}$  – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Это все справедливо до тех пор, пока длина свободного пробега не становится сравнима с характерными размерами термопарного

преобразователя. Студентам предлагается самим оценить, при каких длинах свободного пробега начинает и заканчивает работу термодарная лампа и с какими характерными размерами сравнима длина свободного пробега молекул.

При понижении давления уменьшается теплопроводность газа, соответственно возрастает температура подогревателя и увеличивается термо-ЭДС. Точность измерения давления термодарным вакуумметром существенно зависит от правильного подбора тока накала подогревателя. Как правило, ток накала лампы устанавливается до вскрытия новой лампы либо при откачке преобразователя до давления ниже  $10^{-4}$  мм рт. ст. При этих давлениях теплоотвод по газу пренебрежимо мал и осуществляется только через излучение (63%) и теплоотвод по вводам (37%). То есть калибровка термодарной лампы (установка тока подогревателя) подбирается таким образом, чтобы стрелка милливольтметра точно совпадала с последним делением шкалы. При этих условиях согласно градуировочной кривой термодарного манометрического преобразователя можно по показаниям милливольтметра определить давление в вакуумной системе.

## **4.2 Электронный ионизационный преобразователь**

Работа ионизационных манометрических преобразователей основана на ионизации газа электронным потоком и измерении ионного тока, по которому судят о давлении.

Конструкция манометрических преобразователей, применяемых в лабораторной работе, приведена на рис. 5. В стеклянном баллоне смонтирована трехэлектродная система, состоящая из коллектора ионов, анодной сетки и прямонакального катода. На анодную сетку подается напряжение +200 В относительно катода, а на цилиндрический коллектор –50 В. Анодная сетка выполнена из вольфрамовой проволоки в виде спирали. При прогреве преобразователя и его обезгаживании по спирали пропускается ток 3А.

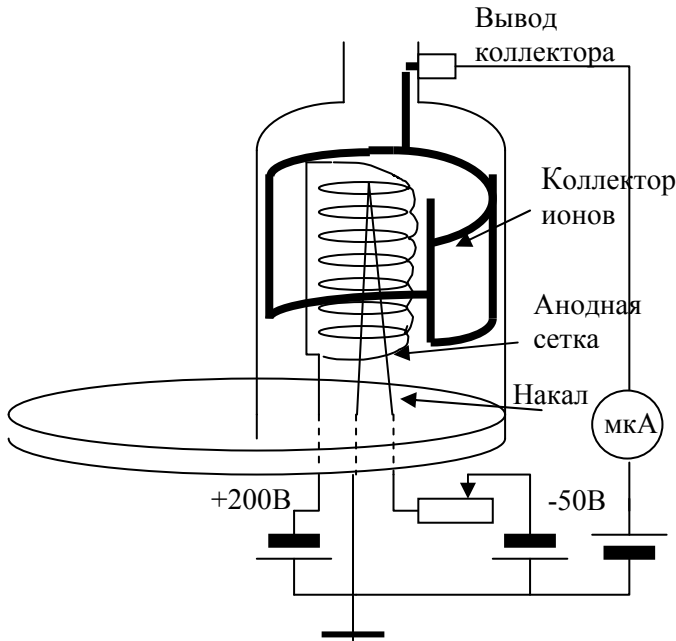


Рис. 5. Схема включения ионизационного преобразователя.

Вольфрамовый катод преобразователя испускает электроны, которые ускоряются электрическим полем и движутся к анодной сетке.

Часть электронов пролетают через анодную сетку и попадают в пространство между анодной сеткой и коллектором. Так как коллектор имеет отрицательный потенциал относительно катода, электроны останавливаются и начинают движение обратно к анодной сетке. В результате у сетки возникают колебания электронов, причем, прежде чем попасть на нее, электроны совершают в среднем 5 колебаний. При столкновении электронов с молекулами газа происходит ионизация молекул. Образовавшиеся положительные ионы попадая на коллектор, создают в его цепи электрический ток. Как показывает опыт, при достаточно низких давлениях (ниже  $10^{-3}$  мм рт. ст.) ионный ток коллектора прямо пропорционален давлению газа, т.е.  $P \sim I_{\text{коллектора}}$ . (точный коэффициент пропорциональности зависит от сорта газа и приведен в описании вакуумметра ВИТ).

### **4.3 Датчик вакуума Пирани**

Вакуумметр Пирани состоит из металлической проволоки, находящейся в измеряемом объеме. При пропускании через нее электрического тока она охлаждается окружающим газом. При уменьшении давления теплоотдача уменьшается, а температура проволоки растет. Сопротивление проволоки зависит от температуры. По изменению сопротивления определяется давление газа.

### **4.4 Датчик вакуума широкодиапазонный**

В широкодиапазонном вакуумметре применены два вакуумметра – вакуумметр Пирани (низкий вакуум) и вакуумметр Пеннинга для среднего и высокого вакуума. Вакуумметр Пеннинга относится к типу вакуумметров с холодным катодом. Действие вакуумметра основано на зависимости от давления тока тлеющего разряда, возникающего в магнитном поле при низких давлениях. При использовании вакуумметра с холодным катодом в «грязных» средах с существенными органическими компонентами, такими как остатки масла насоса, в вакуумметре может произойти рост углеродистых пленок, которые могут замкнуть электроды либо препятствовать генерации разряда

### **4.5 Инверсно-магнетронный преобразователь**

Преобразователь имеет конструкцию магнетрона, у которого проволочный анод расположен по оси окружающего его цилиндрического катода. Между анодом и катодом прикладывается постоянное напряжение (несколько киловольт). Преобразователь расположен в поле постоянного магнита. Под действием электрического и магнитных полей свободные электроны начинают двигаться по траекториям близким к гипоциклоидам. Траектория электронов в преобразователе во много раз превышает расстояние между электродами, поэтому вероятность ионизации и, соответственно, чувствительность преобразователя увеличивается во много раз [1,2].

Рис. 6. Схемы работы измерительных преобразователей среднего и высокого вакуума. А – преобразователь Пеннинга; Б – магнетрон-

ный; В – инверсно-магнетронный; 1 – катод; 2 – анод; направление магнитного поля.

## **5 Описание вакуумной установки и порядок работы**

Принципиальная схема вакуумной установки, в которой применены масляный форвакуумный и масляный диффузионный насосы, приведена на рис.7. Следует отметить, что при выполнении лабораторной работы на установке безмасляной откачки схема принципиально не меняется. В этом случае применяются форвакуумные спиральные насосы типа «улитка» и высоковакуумные турбомолекулярные насосы – и те, и другие воздушного охлаждения. В качестве измерителей используются широкодиапазонные вакуумметры.

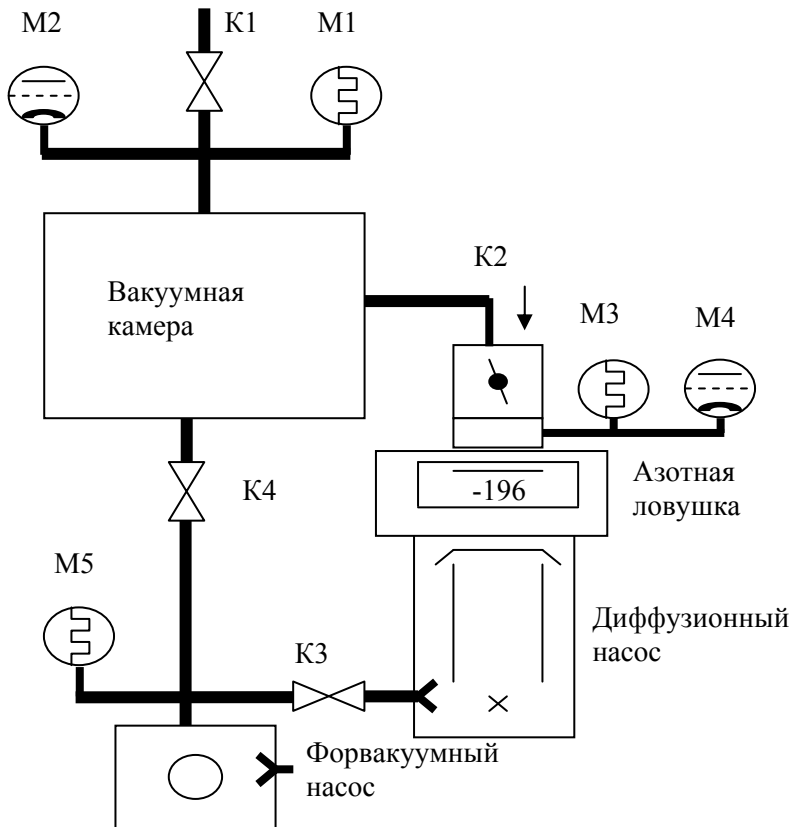


Рис. 7. Схема вакуумной установки. М1, М3, М5 – термопарные манометрические преобразователи (термопарные лампы); М2 и М4 – ионизационные манометрические преобразователи; К1, К3 и К4 – вентили; К2 – поворотный затвор.

Прежде чем приступить к работе, очень внимательно ознакомьтесь с вакуумными установками. Выясните, где расположены вакуумные насосы, краны, затвор где проходят вакуумопроводы и какие узлы они соединяют, какие краны определены на схеме как К1, К2, К3 и К4.



**Выучите** правила пользования и порядок включения и выключения вакуумметра ВИТ. В лабораторной установке используются два прибора типа ВИТ-2. Ознакомьтесь с инструкцией по пользованию.

**ВНИМАНИЕ!** Помните, что при попадании воздуха в горячий диффузионный насос происходит окисление горячего масла, что приводит к выходу насоса из строя.

1. Перед включением форвакуумного насоса 1 проверьте все краны К1 – К4. Они должны быть закрыты.
2. Включите форвакуумный насос. Включите вакуумметр (**Внимание! Не ошибитесь, только термopарную часть!**). Установите (если он не установлен) необходимый ток накала термopарных преобразователей. Он должен быть в пределах  $105 \div 130$  мА (уточняется для каждой лампы отдельно, при

10

давлении меньше мм рт. ст.).

**Включите регистрирующую аппаратуру.** На ее вход подаются сигналы с выхода термопарного преобразователя, измеряющего давление в рабочем объеме М1, и сигналы с ионизационных преобразователей, измеряющих давление в рабочем объеме М2 и в диффузионном насосе М4. Термопарный манометрический преобразователь М3 служит для контроля форвакуума в диффузионном насосе.

3. Откройте кран КЗ и начните откачку диффузионного насоса
2. При достижении давления  $\sim 5 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. включите нагреватель диффузионного насоса и охлаждение. При давлении меньше  $10^{-3}$  мм рт. ст. (стрелка термопарной части ВИТ должна стоять на 10-м делении) включите ионизационную часть вакуумметра М4 обязательно следуя инструкции по эксплуатации. **Помните, что любое неправильное действие может вывести из строя ионизационную лампу либо сам вакуумметр.**

Диффузионный насос готов к проведению эксперимента, если давление в нем меньше  $10^{-5}$  мм рт. ст.

Выключите ионизационную часть вакуумметра М4. Не забывайте, что тумблер «род работы» должен стоять в положении «установка тока эмиссии».

4. Закройте кран К3. Откройте кран К4 и произведите откачку рабочего объема. С этого момента фиксируйте все свои действия с помощью регистратора. Регистратор **не калиброван**, т.е. необходимо отмечать абсолютные показания вакуумметров и сопоставлять с показаниями регистратора.

**Примечание** при работе на установке безмасляной откачки, регистрация показаний вакуумметров ведется при помощи компьютера.

Закройте кран К4 и определите поток газа, поступившего в объем ( $Q'_\Sigma = V \frac{dP}{dt}$  при закрытом кране К4).  $V$  – объем рабочей камеры.

По показаниям регистратора оцените быстроту откачки объема форвакуумным насосом  $P_1 S_0 = Q'_\Sigma - V \frac{dP_{откр. К4}}{dt}$ . ( $P_1$  – давление в рабочем объеме).

5. Откачайте вакуумную камеру до предельного разряжения. Закройте кран К4. Откройте кран К3. Откройте затвор К2. При достижении в рабочем объеме вакуума выше чем  $10^{-3}$  мм рт. ст. включите ионизационные части вакуумметров рабочего объема и диффузионного насоса. Откачайте систему до предельного разряжения. **Обратите внимание на показания термопарных преобразователей. Проверьте правильность установки токов накала термопарных ламп. При правильной установке тока нагревателя стрелки должны стоять на 10-м делении.** Закройте затвор К2. Определите натекание плюс газовыделение  $Q'_\Sigma$ . Определите предельное давление  $P_{пред.}$  диффузионного насоса. Рассчитайте быстроту действия диффузионного насоса и проводимость трубопровода. При определении натекания внимательно следите за показаниями ионизационной части вакуумметра и вовремя переключайте диапазоны измерений.

$$S_{Дн} = \frac{-V \frac{dP}{dt} + Q_{\Sigma}'}{P_{нас.} - P_{пред.}} = \frac{-V \frac{dP_{отк.}}{dt} + V \frac{dP_{зак.}}{dt}}{P_{нас.} - P_{пред.}} ;$$

$$U = \frac{-V \frac{dP_{отк.}}{dt} + V \frac{dP_{зак.}}{dt}}{P - P_{нас.}}$$

$\frac{dP_{отк.}}{dt}$  – определяется при открытом затворе К2;

$\frac{dP_{зак.}}{dt}$  – определяется при закрытом затворе К2.

6. Повторите измерения по п.5 для трубопроводов различной длины и внутреннего диаметра. Для этого необходимо вскрыть рабочий объем:

- 1) **выключить** ионизационный преобразователь М2, установленный в рабочем объеме, согласно правилу эксплуатации ВИТ;
- 2) закрыть затвор К2;
- 3) открыть кран К1 и напустить воздух.

После этого аккуратно откройте рабочий объем. После замены макета трубопровода закройте объем. Обратите внимание, что до калибровки термопарной лампы в рабочем объеме все измерения по п. 4 являются приблизительными, их необходимо повторить и затем перейти к п. 5. Сравните измерения с рассчитанной по формуле проводимостью трубопроводов круглого сечения (для  $\ell/d > 5$  с точностью до 5% при температуре воздуха 293°К.)

Для молекулярного режима течения газа:

$$U = 38,1 \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot \frac{d^3}{\ell} = 121 \frac{d^3}{\ell} \left( \frac{м^3}{с} \right)$$

Для вязкостного течения газа:

$$U = 1360 \frac{d^4}{\ell} \cdot \frac{P_1 + P_2}{2} \left( \frac{M^3}{c} \right) = \frac{\pi d^4}{128 \eta \ell} \cdot \frac{P_1 + P_2}{2}$$

$d$  – диаметр трубопровода, м;  $\ell$  – длина трубопровода;  $P_1$  и  $P_2$  – давление на концах трубопровода;  $\eta$  – динамическая вязкость воздуха (Па·с);  $T$  – температура (К),  $M$  – молярная масса, кг/моль.

Выключите установку в следующем порядке:

- 1) Выключить ионизационные лампы.
- 2) Закрыть затвор К2.
- 3) Выключить нагреватель диффузионного насоса.
- 4) После того как в диффузионном насосе давление возрастет до  $\sim 10^{-2}$  мм рт. ст., закрыть кран К3 и перекрыть воду.
- 5) Выключить форвакуумный насос и напустить в него воздух.

В отчете представьте результаты наблюдений, измерений и быстроту откачки объема. Кроме того, ответьте на ряд вопросов и сделайте некоторые оценки, например:

- 1) Оценить быстроту откачки вакуумного объема форвакуумным насосом при давлениях  $\sim 2 \cdot 10^{-1}$ ;  $5 \cdot 10^{-2}$ ;  $10^{-2}$  мм рт. ст. Объясните, что является определяющим в каждом случае: проводимость вакуумпровода или быстрота откачки форвакуумного насоса.
- 2) Оцените длину свободного пробега молекул при заданном давлении ( $10^{-1}$ ;  $10^{-3}$ ;  $10^{-5}$  мм рт. ст.).
- 3) Какой режим течения при данных давлениях?
- 4) Какой характер носит процесс разряжения: изотермический, адиабатический или политропический?
- 5) Каков порядок включения установок?
- 6) Какие виды вакуумных насосов вы знаете? Объясните принцип их действия.
- 7) Объясните назначение элементов установки.

## Список литературы

1. Ашкенази А.Л. Вакуум для науки и техники. М.: Наука, 1987.
2. Деишман С. Научные основы вакуумной техники. М.: Мир, 1964.
3. Левич Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973.
4. Основы вакуумной техники/А.И.Пипко, В.Я.Плисковский и др. М.: Энергоиздат, 1981.

5. *Вакуумная техника*. Справочник. М., Машиностроение, 1992.