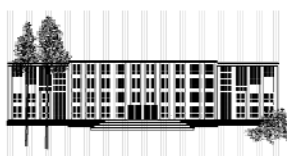


Молекулярный практикум

Лабораторная работа 1.4 Знакомство с методами получения и измерения вакуума



Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Новосибирский государственный университет

Физический факультет
Кафедра общей физики

**Лабораторная работа 1.4
Знакомство с методами
получения и измерения вакуума**

Молекулярный практикум

Методическое пособие
к лабораторным работам

© Интернет версия подготовлена для
сервера Физического факультета НГУ
<http://www.phys.nsu.ru>

Составитель к.т.н. О.А. Брагин

Новосибирск
2006

Оглавление

Общие сведения. Теоретические основы	4
Процессы откачки.....	4
Техника получения вакуума	7
Форвакуумный насос	8
Диффузионный насос.....	8
Техника измерения давления разряженных газов (вакууметры).....	10
Манометрический термодарный преобразователь	10
Электронный ионизационный преобразователь	11
Описание вакуумной установки и порядок работы	12
Литература	14

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

Оборудование: вакуумная установка, состоящая из форвакуумного и диффузионного насосов, трубопроводов, рабочего объема, вакууметров, регистраторов.

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 $1 \div 10^{-3} \text{ мм.рт.ст.}$

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

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 $10^{-7} \text{ мм.рт.ст.}$

Теоретический расчет средней длины свободного пробега молекул газа дается формулой $\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma}$, где σ – 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, λ' – средняя длина свободного пути молекул при давлении 1 мм.рт.ст. Для воздуха при температуре 298 К $\bar{\lambda} = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$ Из этого следует простая зависимость для оценки длины свободного пробега для различных давлений:

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

Процессы откачки

Течение газа в вакуумной системе зависит от ряда параметров: температура 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*. 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 - $K_n = \frac{\bar{\lambda}}{D}$. Молекулярному течению соответствует $K_n > \frac{1}{3}$, 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 проходящие через это сечение в единицу времени S_i .

$$Q'_i = P_i S_i.$$

4. Поток газа протекающий 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. *Сопротивление 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 быстроте действия насоса S_n и проводимости U трубопровода при условии постоянства потока $Q = const$. Из условия

$$Q' = S_0 P_0 = U(P_0 - P_n) = S_n P_n = \text{const} \text{ следует}$$

$$S_0^{-1} = U_0^{-1} + S_n^{-1} \text{ или } S_0' = \frac{U \cdot S_n}{U + S_n}.$$

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 достаточно 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_Σ' - 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_Σ' и S_0' не зависят от давления

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

или

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

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 температуры поверхности и увеличивается при возрастании температуры, поэтому эффективным приемом снижения газовыделения 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. 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.

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*, действие которых основано на сообщении молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости непрерывно истекающей струей пара и механический *молекулярными*, в которых эта скорость сообщается 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 отмечаются 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 жидким 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 два насоса: пластинчато-статорный форвакуумный насос, создающий предварительное разряжение и диффузионный (пароструйный) насос, создающий высокий вакуум.

Форвакуумный насос

Схема пластинчато-статорного насоса приведена на рис. 1.4.1. В пазу 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 превысит давления в клапане 6, последний откроется и газ вытесняется в выхлопной патрубок.

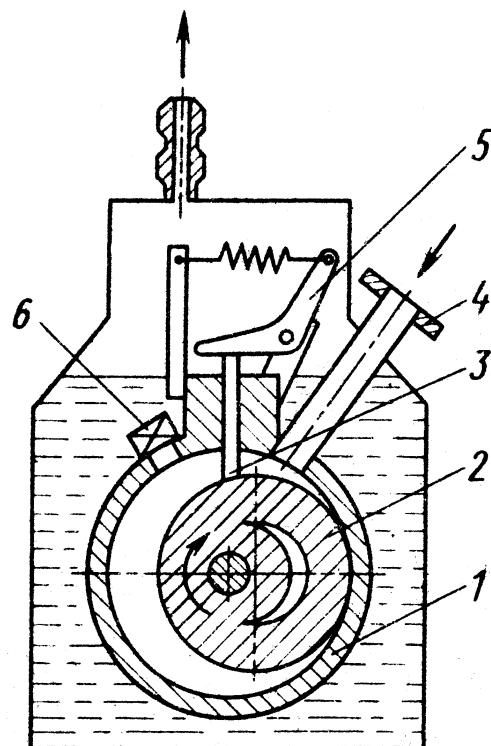


Рис 1.4.1

Характерная особенность пластинчато-статорных вакуумных насосов маслозаполненного 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.

Диффузионный насос

Диффузионные насосы предназначены для работы в области высокого и сверхвысокого вакуума, т.е. при давлениях 10^{-3} мм.рт.ст. $\div 10^{-7}$ 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^{-2} мм.рт.ст., что и обеспечивается форвакуумным насосом.

Схема устройства паромасляного диффузионного насоса, наиболее распространенного в настоящее время, показана на рис.1.4.2. 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.

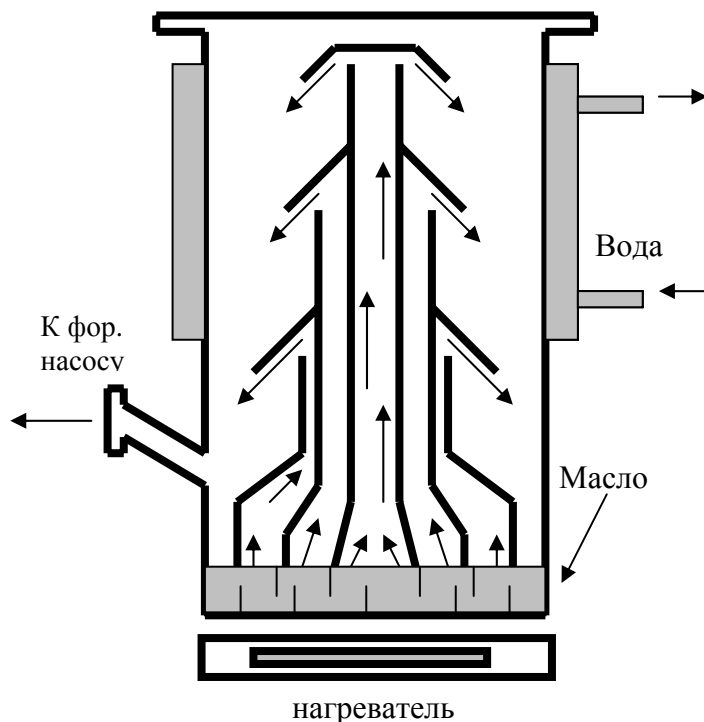


Рис 1.4.2

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 (кол-во движения) молекулам откачиваемого газа и направить их вниз к выхлопной трубе. 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 диффузионных насосов, 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 ступени 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.

Техника измерения давления разряженных газов (вакууметры)

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 ρ* или *молекулярная концентрация N_1* газа. Именно они определяют теплоперенос, сорбционно-десорбционные процессы, воздействие газа на элементы электронных приборов и другие явления, наблюдаемые в вакууме. Приборы для измерения давления газа ниже атмосферного называются вакууметрами. Большинство вакууметров состоит из двух элементов: *манометрического преобразователя* сигнала давления в электрический сигнал и *измерительного блока*.

По принципу действия вакууметры можно свести в следующие классы:

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

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

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

Тепловые вакууметры, использующие зависимость теплопроводности газа от давления. Они подразделяются на термодарные и вакууметры 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 вакууметров: термодарный (до давления 10^{-3} мм.рт.ст. и ионизационный для более высокого вакуума).

Манометрический термодарный преобразователь

Преобразователь (рис.1.4.3) представляет собой стеклянный или металлический корпус, в котором на двух вводах смонтирован подогреватель, на двух других вводах крепится термодара, изготовленная из хромель-копеля или хромель-алюмеля. Термодара соединена с подогревателем, который нагревается током, который можно регулировать реостатом и измерять миллиамперметром. Спай термодары, нагреваемый подогревателем, является источником термо-э.д.с., значение которой показывает милливольтметр.

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.

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

λ_a – коэффициент теплопроводности;

ρ – 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 термопарная лампа и с какими характерными размерами сравнима длина свободного пробега молекул).

При понижении давления уменьшается теплопроводность газа, соответственно возрастает температура подогревателя и увеличивается термо-э.д.с. Точность измерения давления термопарным вакууметром 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%). Таким образом калибровка термопарной лампы, (установка тока подогревателя) подбирается таким образом, чтобы стрелка милливольтметра точно совпадала с последним делением шкалы. При этих условиях согласно градуировочной кривой термопарного манометрического преобразователя можно по показаниям милливольтметра определить давление в вакуумной системе.

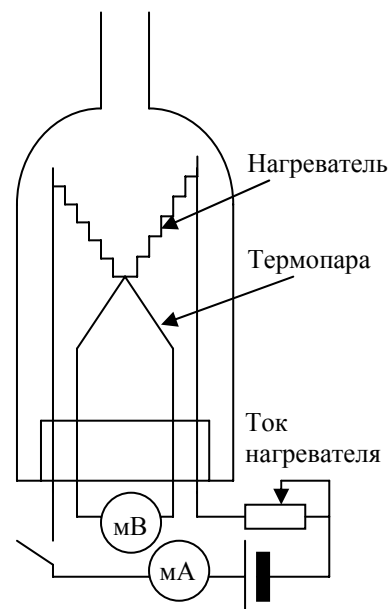


Рис 1.4.3

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.1.4.4. 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.

Вольфрамовый катод преобразователя испускает электроны, которые ускоряются электронным 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

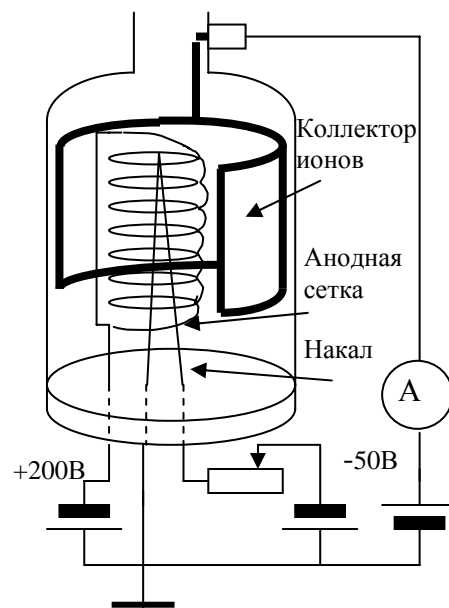


Рис 1.4.4

колеблются электроны, 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. $P \sim I_{\text{коллектора}}$.

Описание вакуумной установки и порядок работы

Принципиальная схема вакуумной установки приведена на рис.1.4.5.

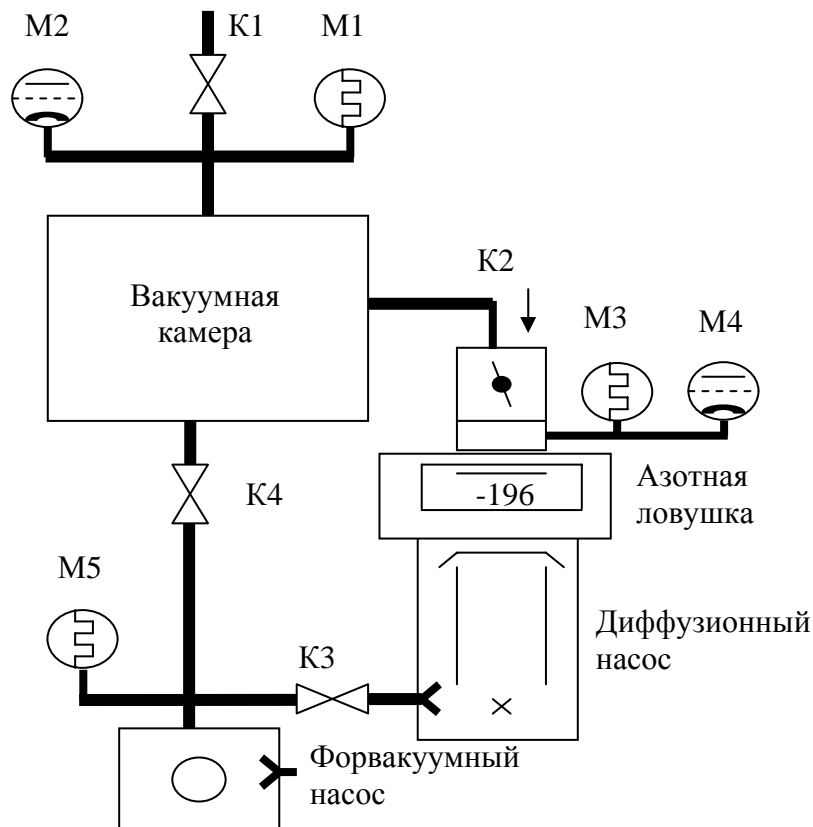


Рис.1.4.5. Принципиальная схема вакуумной установки.

M1, M3, M5 – термопарные манометрические преобразователи (термопарные лампы); M2 и M4 – ионизационные манометрические преобразователи; K1, K3 и K4 – вентили; K2 – 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 K1, K2, K3 и K4. **Выучите** правила пользования и порядок включения и выключения вакуумметра ВИТ. (В лабораторной установке используются два прибора типа ВИТ-2, краткая инструкция по пользованию приведена в приложении).

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 K1 – K4. Они должны быть закрытыми.
2. Включите форвакуумный насос. Включите вакуумметр (**Внимание! Не ошибитесь, только термопарную часть!**). Установите (если он не установлен) необходимый ток накала термопарных преобразователей. Он должен быть в пределах $105 \div 130$ мА (уточняется для каждой лампы отдельно, при давлении меньше 10^4 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.

- Откройте кран К3 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.

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

- 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. Закройте кран К4 и определите поток газа Q_{Σ}' ,

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).

- Откачайте объем 2 до предельного разряжения. Закройте кран К4. Откройте кран К3. Откройте затвор К2. При достижении вакуума лучше чем 10^{-3} мм.рт.ст. в рабочем объеме 2, 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_{Σ}' . 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.

- 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 термпарной лампы в рабочем объеме, все измерения по п. 4 являются приблизительными и 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:

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

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; ℓ - длина трубопровода; P_1 и P_2 – давление на концах трубопровода; η - 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 ~10–2мм.рт.ст. закрыв кран К3 и перекрыть воду.
- 5) Выключить форвакуумный насос и напустить в него воздух.

В отчете представить 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. Качественно 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) Какие виды вакуумных насосов Вы знаете? Принцип их действия.

Литература

1. Ашкенази А.Л. Вакуум для науки и техники. М.: Наука, 1987.
2. Дешман 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.