

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.

ПОЛУЧЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА

Цель работы: ознакомиться с методами получения и измерения вакуума. Определить скорость откачки форвакуумного насоса.

Приборы и принадлежности: вакуумная установка, состоящая из форвакуумного пластинчато-роторного насоса 2НВР-5ДМ, вакуумной камеры и вакуумметра ВТ-2, секундомер.

Теория метода

Вакуум - состояние газа, при котором его давление значительно ниже атмосферного.

При разрежении газа средняя длина свободного пробега молекул возрастает, поэтому степень вакуума принято оценивать путем сопоставления средней длины свободного пробега $\bar{\lambda}$ с характерными размерами L откачиваемого сосуда, например, для сферы диаметром D : $L = (2/3) D$.

Различают три области вакуума:

1. **Низкий вакуум** – это состояние газа, при котором взаимные столкновения между молекулами преобладают над столкновениями молекул газа со стенками вакуумного сосуда, при этом $\bar{\lambda} \ll L$.

2. **Средний вакуум** – это состояние газа, когда частоты соударений молекул друг с другом и со стенками сосуда приблизительно одинаковы, при этом $\bar{\lambda} \sim L$.

3. **Высокий вакуум** – это состояние газа, при котором столкновения молекул газа со стенками сосуда преобладают над взаимными столкновениями молекул газа, при этом $\bar{\lambda} \gg L$.

При не слишком малых размерах сосуда (не поры и не капилляры) степень вакуумирования можно характеризовать величиной давления газа. Связь между давлением и средней длиной свободного пробега ясна из табл. 1.

Таблица №1

P , Па	P , мм. рт.ст.	λ , м	Области вакуума (ГОСТ 5197-50)
$1,013 \cdot 10^5$	760	$6,25 \cdot 10^{-7}$	атм.
$1,333 \cdot 10^2$	1	$4,72 \cdot 10^{-5}$	низкий вакуум средний вакуум
1,333	10^{-2}	$4,72 \cdot 10^{-3}$	
$1,333 \cdot 10^{-2}$	10^{-4}	$4,72 \cdot 10^{-1}$	
$1,333 \cdot 10^{-2}$	10^{-4}	$4,72 \cdot 10^{-1}$	высокий вакуум
$1,333 \cdot 10^{-5}$	10^{-7}	$4,72 \cdot 10^2$	

Вакуум широко используется в современной науке, технике и технологии. Например, явление уменьшения теплопроводности газов в области высокого

вакуума применяется при теплоизоляции. Общеизвестно использование вакуума в электронной технике, в ускорителях элементарных частиц, в процессах сушки, испарения, дистилляции и т.п. Особенно широко вакуумная техника применяется в производстве сверхчистых веществ, полупроводников и микросхем.

Способы получения вакуума.

Состояние разряжения газов достигается с помощью вакуумных насосов.

В процессе откачки используются **два свойства газов**:

1. способность занимать весь предоставленный объем,
2. проникновение молекул одного газа между молекулами другого (взаимная диффузия).

Первое свойство используется в механических насосах, второе – в диффузионных.

Принципиальная схема одного из распространенных типов механических насосов представлена на рис.1.

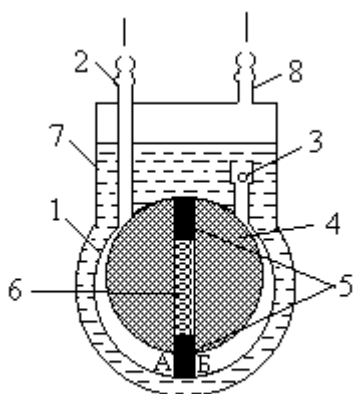


Рис. 1

Насос состоит из цилиндрической камеры 1 с входным патрубком 2 и выходным клапаном 3. Внутри камеры вращается цилиндрический ротор 4, эксцентрично расположенный относительно оси симметрии камеры. В прорези ротора вставлены две пластины 5, плотно прижимаемые к внутренней поверхности камеры пружинами 6. Для уплотнения рабочих зазоров роторного механизма, выхлопного клапана 3 и смазки трущихся поверхностей корпус насоса помещается в кожух 7, заполненный вакуумным маслом. Вакуумные масла (ВМ-1, ВМ-5) отличаются низким давлением ($p_n \sim 10^{-5}$ Па) насыщенного пара при

комнатной температуре.

Пластины 5 образуют во внутреннем объеме между ротором и корпусом камеру А всасывания и камеру Б сжатия. Объем этих камер при вращении ротора непрерывно изменяется. Причем в то время, когда объем камеры всасывания увеличивается и откачиваемый газ заполняет ее через впускной патрубок 2, объем камеры сжатия Б уменьшается и газ из нее выбрасывается через выхлопной патрубок 10 в атмосферу. Процесс через каждые поворота ротора повторяется.

Насосы подобной конструкции позволяют производить откачку лишь до давления $P \sim 10^{-3}$ мм рт.ст. Это объясняется прорывом газов в месте соприкосновения ротора с цилиндрической камерой вследствие большой разности давления. Поэтому подобные насосы применяются для создания низкого предварительного вакуума (**форвакуума**) и называются форвакуумными.

Для получения высокого вакуума применяются диффузионные насосы. Принцип действия такого насоса основан на том, что пары какой-либо жидкости, вырываясь с большой скоростью из сопла, уносят с собой продиффундировавшие в них молекулы откачиваемого газа.

Обратный поток газа в откачиваемый сосуд устраняется тем, что выброс смеси пара с газом происходит в область пониженного давления (в баллон предварительного разрежения), создаваемого форвакуумным насосом.

Диффузионные насосы позволяют производить разрежение газов до $P = 10^{-6}$ мм.рт.ст.

На рис. 2 изображена схема двухступенчатого разгонного паромасляного диффузионного насоса ММ – 40А. Он состоит из корпуса 1, паропроводов 2 и 3 и электронагревателя 4. Корпус насоса представляет собой стальной цилиндр, нижняя часть которого вместе с днищем служит испарителем. Корпус снабжен рубашкой водного охлаждения 5 со штуцерами для ввода и вывода проточной воды. Для соединения с откачиваемым сосудом служит патрубок 7. Откачиваемый воздух из камеры Д удаляется через патрубок 11 в область форвакуума.

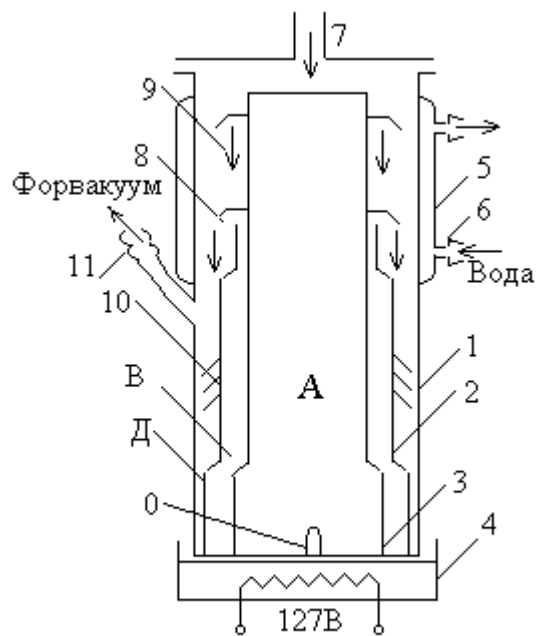


Рис. 2

Все масло в испарителе распределяется по трем коаксиальным камерам: А – внутренняя камера в цилиндре 3, В – кольцевая камера между цилиндрами 2 и 3, Д – кольцевая камера между цилиндром 2 и стенкой корпуса 1. Вначале во всех камерах насоса масло имеет один и тот же состав. При разогревании легкие его фракции испаряются, конденсируются на стенках холодильника и стекают в камеру Д. Испарение в этой камере слабое, так как непрерывно поступает охлажденное масло, и, кроме того, пары, вышедшие из этой камеры, задерживаются манжетами 10. Далее легкие фракции через отверстия 0 поступают в камеру В. Здесь они испаряются и выходят через сопло первой ступени 8. Таким образом, в центральной круговой камере остаются наиболее тяжелые фракции масла, и в сопло второй ступени 9, ближайшее к откачиваемому объекту, попадают пары только этих тяжелых фракций, обладающие минимальным давлением насыщенных паров $p_n \sim 10^{-6}$ мм.рт.ст.

Поскольку при работе насоса происходит отделение легких фракций масла по принципу разгонки в жидкой фазе, насос называется разгонным.

Для работы насоса ММ – 40 А необходимо наличие предварительного разрежения до $p \sim 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. Производительность насоса 40 л/с при давлении $p = 10^{-4}$ мм рт.ст. Предельный вакуум, достигаемый насосом, $p = 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.

Сверхвысокий вакуум ($p \sim 10^{-11}$ мм.рт.ст. получают с помощью молекулярных, электроразрядных или сорбционных насосов в соединении с форвакуумными насосами и охлаждаемыми до -196°C жидким азотом ловушками. При этом требуется обязательное предварительное обезгаживание вакуумной системы путем длительного прогрева ее до $\sim 450^\circ\text{C}$ при непрерывной откачке.

Измерение вакуума.

Под измерением вакуума понимают измерение давления разреженного газа. В зависимости от диапазонов измеряемых давлений применяют различные типы манометров. Основными из них являются жидкостные (ртутные), термоэлектрические, электроразрядные и магнитные.

В настоящей работе применяется термопарный манометр (рис. 3). Он состоит из двух частей: манометрической лампы ЛТ – 4М, подключаемой к вакуумной системе, и электрического измерительного прибора ВТ – 2А. Манометрическая лампа выполняет функцию датчика, а с помощью прибора устанавливается режим работы лампы и измеряется давление.

Манометрическая лампа состоит из металлического баллона 1, внутри которого помещена нить накала 2, в виде тонкой платиновой проволоки, и термопары 3 из хромеля и копеля. Термопара приварена к средней части нити накала, благодаря чему между ними осуществляется хороший тепловой контакт. Отросток 4 служит для подключения лампы к вакуумной системе.

Принцип действия манометра заключается в том, что при достаточно низком давлении, когда средняя длина свободного пробега молекул $\bar{\lambda} \sim L$, теплопроводность газа начинает зависеть от давления. Чем меньше давление, тем меньше теплоотдача с нити накала и поэтому выше температура горячего спая термопары, а следовательно, и ЭДС термопары при том же токе накала.

Прибор ВТ–2А, измеряющий термо-ЭДС термопары, может быть проградуирован в милливольты или непосредственно в единицах измеряемого давления.

Определение скорости откачки насоса.

Скорость откачки - объем газа, удаляемый насосом в единицу времени из разряжаемого сосуда при постоянном давлении:

$$S = \left(\frac{dV}{dt} \right)_p. \quad (1)$$

С уменьшением давления скорость откачки понижается.

Скорость откачки может быть определена экспериментально. Пусть в некоторый момент времени t в сосуде объемом V давление данной массы газа равно p . При откачке за малый промежуток времени dt объем газа увеличивается на величину dV . Та же масса газа теперь занимает больший объем $(V + dV)$. Давление внутри сосуда изменится на величину dp и станет равным $(p + dp)$. (Очевидно, что величина dp отрицательна). Полагая, что процесс откачки происходит при постоянной температуре, согласно закону Бойля-Мариотта можно записать

$$PV = (p + dp)(V + dV), \quad (2)$$

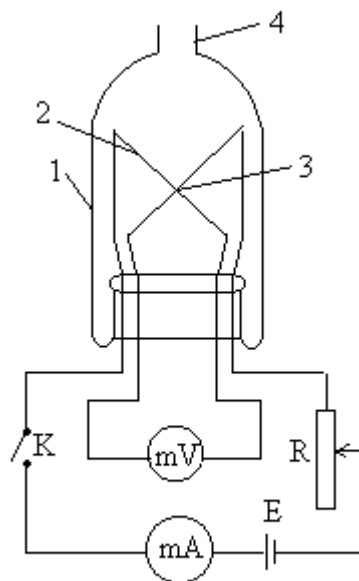


Рис. 3

или, раскрывая скобки и пренебрегая величиной второго порядка малости $dp \cdot dV$, получим

$$dV = -V \frac{dp}{p} = -V \cdot d(\ln p). \quad (3)$$

Поделив обе части последнего выражения на dt , согласно определению (1) имеем:

$$S = \frac{dV}{dt} = -V \frac{d(\ln p)}{dt}. \quad (4)$$

$$\text{Учитывая, что:} \quad -d(\ln p) = d(\ln p_0 - \ln p) = d \ln \frac{p_0}{p}, \quad (5)$$

(где p_0 – давление в начальной момент времени и, следовательно, постоянная величина), получим:

$$S = V \frac{d \ln(p_0/p)}{dt}. \quad (6)$$

Формула (6) используется при экспериментальном определении скорости откачки насоса.

Описание установки

Блок-схема лабораторной установки приведена на рис. 4, где приняты следующие условные обозначения: 2НВР-5ДМ – форвакуумный пластинчатороторный насос; Б – откачиваемый баллон, ЛТ-4М манометрическая лампа, К – кран, соединяющий вакуумную систему с атмосферой.

Предупреждения! К выполнению работ приступать только после ознакомления с описанием. При выполнении работы соблюдать следующие меры предосторожности:

а) без разрешения преподавателя установку не включать;

б) кран К открывать только при неработающем насосе;

в) при повороте рукоятки вакуумного крана необходимо одной рукой поддерживать его за корпус, чтобы не сдвинуть с места крепления и не повредить;

г) во избежание перегорания нити нагревателя манометрической лампы нельзя устанавливать ток накала выше указанного значения на баллоне лампы.

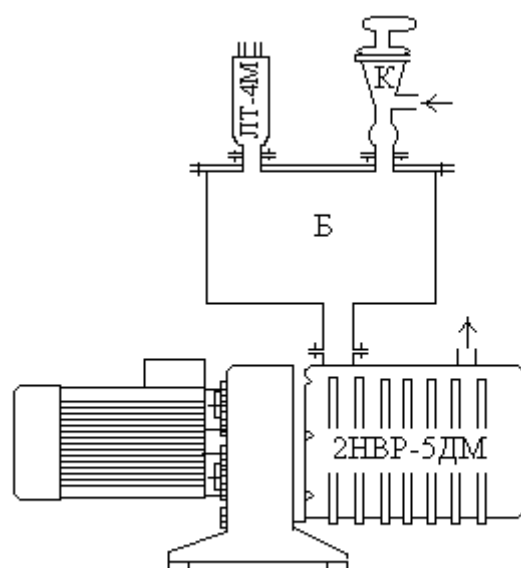


Рис. 4

Включение установки

1. Подготовьте к работе термопарный вакуумметр, для чего переключатель "ДИАПАЗОН ИЗМЕРЕНИЙ" поставьте в положение " $10^{-1} \div 10^{-3}$ ", а ручку реостата "РЕГУЛИРОВКА ТОКА НАКАЛА" – в крайнее левое положение.

2. Подключите вакуумметр к щитку питания (220В) и включите тумблер "СЕТЬ", при этом загорится сигнальная лампа.

3. Переключатель "ТОК НАКАЛА - ИЗМЕРЕНИЕ" поставьте в положение "ТОК НАКАЛА", реостатом "РЕГУЛИРОВКА ТОКА НАКАЛА" установите по нижней шкале прибора рабочий ток манометрической лампы ЛТ-4М, указанный на ее баллончике, после чего переведите переключатель в положение "ИЗМЕРЕНИЕ". Вакуумметр готов к работе.

4. Закрыв кран К, изолируйте вакуумную систему от атмосферы, подготовьте таблицу для записи показаний и поворотом рубильника на щитке питания включите форвакуумный насос.

Определение скорости откачки форвакуумного насоса.

Вам предлагается проследить за изменением давления в вакуумной системе с течением времени и по результатам наблюдений определить скорость откачки форвакуумного насоса в определенный момент времени работы насоса. Для этого:

1) Включите секундомер в тот момент времени, когда давление составит $p_0 = 2 \cdot 10^{-1}$ мм.рт.ст. Отсчет давления производится по верхней логарифмической шкале вакуумметра. Однако для упрощения процесса измерения рекомендуется предварительно производить отсчет в делениях средней линейной шкалы. Затем полученные показания перевести в мм.рт.ст. по верхней шкале или по прилагаемому градуировочному графику милливольтметра.

Величину давления рекомендуется отсчитывать через каждые 15 секунд в течение первой минуты, а затем через каждую минуту в течение 7÷10 минут.

2) Результаты измерений занести в табл. 2.

Таблица № 2

Время отсчета	Давление p		p ₀ /p	ln(p ₀ /p)
	дел.	мм. рт. ст.		
0	10	$2 \cdot 10^{-1}$		0
15"				
30"				
45"				
1'				
2'				
·				
...				

3) Представьте изменение давления с течением времени графически, откладывая по оси X время в секундах, а по оси Y - $\ln(p_0/p)$ ($p_0 = 2 \cdot 10^{-1}$ мм рт.ст. –

давление в начальный момент времени). Примерный вид графика представлен на рис. 5.

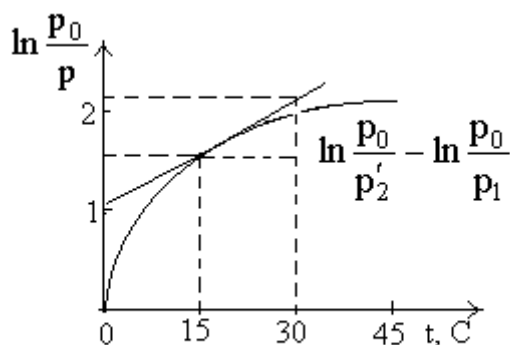


Рис. 5

неизменной с момента $t_2=15$ с).

Тогда, как видно из рис. 5,

$$tq\alpha = \frac{d \ln(p_0/p)}{dt} = \frac{\ln(p_0/p'_2) - \ln(p_0/p_1)}{t_2 - t_1}.$$

Зная объем всей вакуумной системы V и определив по графику разность $\ln(p_0/p'_2) - \ln(p_0/p_1)$, вычислите скорость откачки S при давлении p_1 по формуле

$$S_{p_1} = V \frac{\ln(p_0/p'_2) - \ln(p_0/p_1)}{t_2 - t_1}.$$

Численное значение V приведено на установке. ($V = 3,45$ л.)

Контрольные вопросы

1. Какое состояние газа называется вакуумом? Высоким вакуумом?
2. Какие физические свойства газа используются в процессе получения вакуума?
3. В чем заключается принцип работы форвакуумного насоса? Диффузионного насоса?
4. Чем отличаются вакуумные масла от обычных смазочных масел?
5. Что называется скоростью откачки насоса? От чего она зависит?
6. Опишите принцип действия термпарного вакуумметра.
7. Как получают сверхвысокий вакуум?

Литература

1. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. Школа, 1990, с.85.
2. Кортнев Т.В., Рублев Ю.В., Куценко А.Н, Практикум по физике. М.: Высшая школа, 1965, с. 172-184.