

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа № 2.3.1

Получение и измерение вакуума.

Выполнил
студент группы Б04-006
Вовк Дмитрий

Долгопрудный, 2021

Цель работы:

- 1) Измерение объемов форвакуумной и высоковакуумной частей установки.
- 2) Определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и улучшению вакуума.

Оборудование:

вакуумная установка с манометрами: масляным, термопарным и ионизационным.

1. Установка

В данной работе используются традиционные методы откачки механическим форвакуумным насосом до давления 10–2 торр и диффузионным масляным насосом до давления 10–4 торр.

Установка изготовлена из стекла, и состоит из форвакуумного баллона (ФБ), высоковакуумного диффузионного насоса (ВН), высоковакуумного баллона (ВБ), масляного (М) и ионизационного (И) манометров, термопарных манометров (М1 и М2), форвакуумного насоса (ФН) и соединительных кранов (К1, К2, ..., К6) (рис. 1). Кроме того, в состав установки входят: вариатор (автотрансформатор с регулируемым выходным напряжением), или реостат и амперметр для регулирования тока нагревателя диффузионного насоса

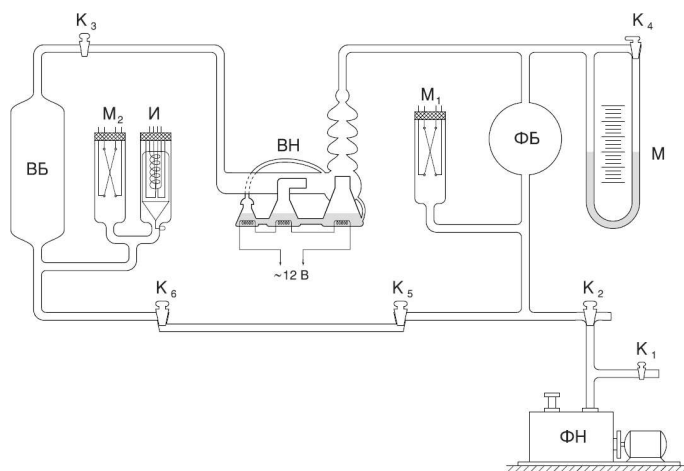


Рисунок 1 - Схема установки.

Устройство и принцип действия диффузионного насоса схематически изображены на рис 3. Такой насос работает в тысячи раз быстрее форвакуумного. Его действие основано на диффузии. Масло, налитое в сосуд А, подогревается электрической печкой. Пары масла поднимаются по трубке Б и вырываются из сопла В. Струя паров увлекает молекулы газа, которые поступают из откачиваемого сосуда через трубку ВВ. В трубке Г мало осаждается и стекает вниз. Оставшийся газ, выходя в трубку ФВ, откачивается форвакуумным насосом.

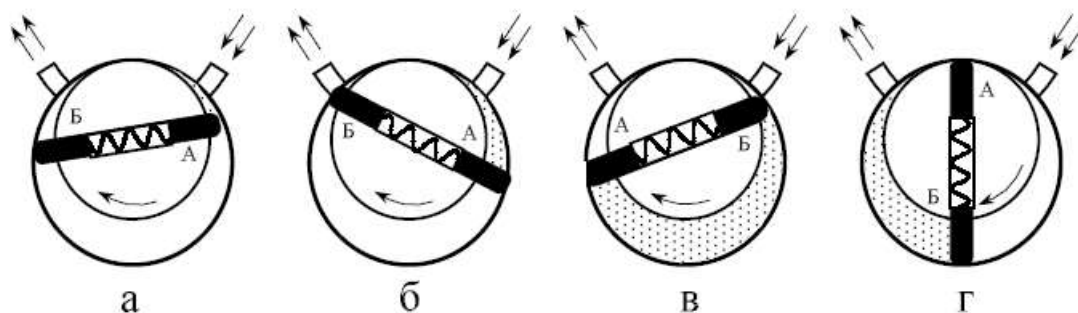


Рисунок 2 - Схема устройства форвакуумного насоса

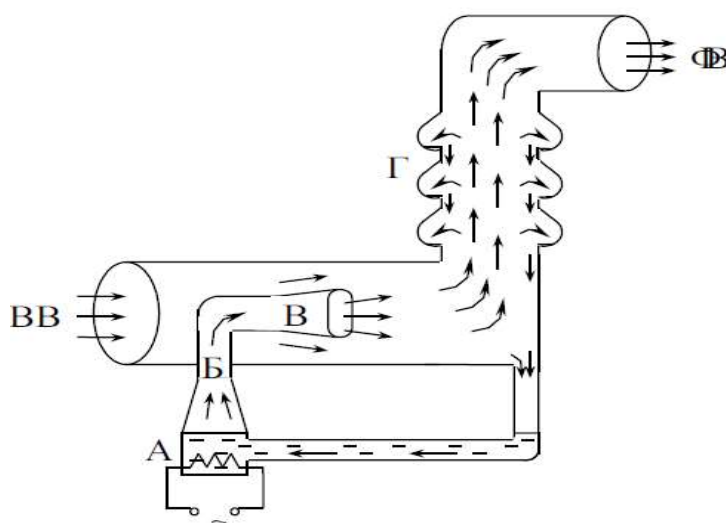


Рисунок 3 - Схема устройства диффузионного

Термопарный манометр. Чувствительным элементом манометра является платиновородиевая термопара, спаянная с никелевой нитью накала и заключённая в стеклянный баллон. Устройство термопары пояснено на рис. 4. По нити накала НН пропускается ток постоянной величины. Для установки тока служит потенциометр R, расположенный на передней панели вакуумметра. Термопара ТТ присоединяется к милливольтметру, показания которого определяются температурой нити накала и зависят от отдачи тепла в окружающее пространство. Потери тепла определяются теплопроводностью нити и термопары, теплопроводностью газа, переносом тепла конвективными потоками газа внутри лампы, и теплоизлучением нити (инфракрасное тепловое излучение). В обычном режиме лампы основную роль играет теплопроводность газа. При давлениях, не меньших 1 торр, теплопроводность газа, а вместе с ней и ЭДС термопары практически не зависят от давления газа, и прибор не работает. При улучшении вакуума средний свободный пробег молекул становится сравнимым с диаметром нити, теплоотвод падает, и температура спая возрастает. При вакууме порядка 10–3 торр теплоотвод, осуществляемый газом, становится сравнимым с другими потерями тепла, и температура становится практически постоянной. Градуировочная кривая термопары приведена на рис. 5.

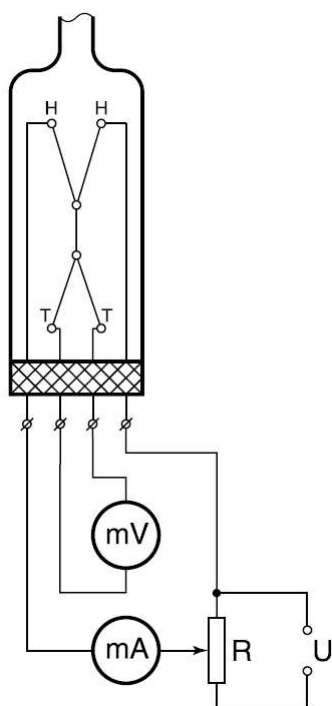


Рисунок 4 - Схема термодатчика с лампой ЛТ-2

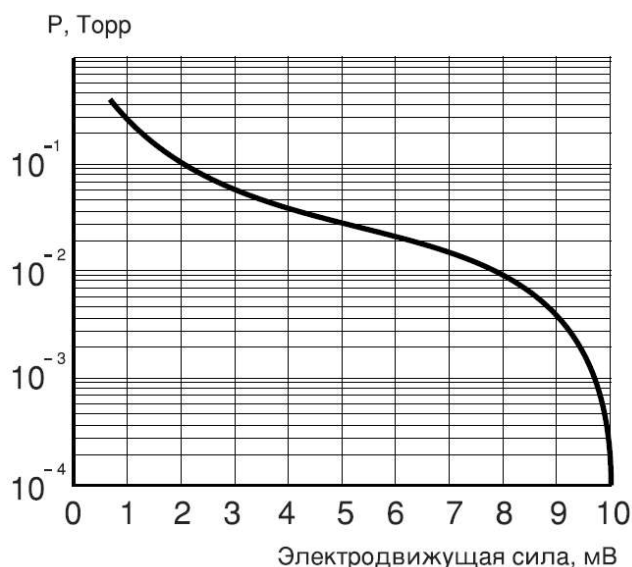


Рисунок 5 - Градуировочная кривая термопары ЛТ-2

Ионизационный манометр. Схема ионизационного манометра изображена на рисунке 6. Он представляет собой трехэлектродную лампу. Электроны испускаются раскалённым катодом и увлекаются электрическим полем к аноду, имеющему вид редкой спирали. Проскакивая за её витки, электроны замедляются полем коллектора и возвращаются к аноду. Прежде чем осесть на аноде, они успевают много раз пересечь пространство между катодом и коллектором. На своём пути электроны ионизуют молекулы газа. Ионы, образовавшиеся между анодом и коллектором, притягиваются полем коллектора и определяют его ток. Накалённый катод ионизационного манометра перегорает, если давление в системе превышает 10–3 торр, поэтому перед его включением необходимо проверить давление термодатчиком.

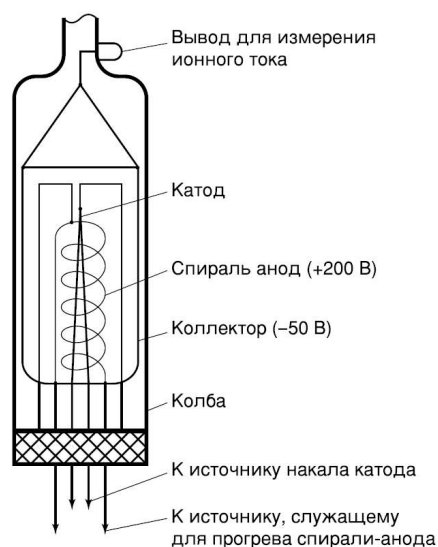


Рисунок 6 - Схема ионизационной лампы ЛТ-2

2. Теория

2.1 Процесс откачки

Опишем процесс откачки математически: Пусть W — объем газа, удаляемого из сосуда при данном давлении за единицу времени, Q_i для различных значений i обозначим различные притоки газа в сосуд (в единицах PV), такие как течи извне Q_i , десорбция с поверхностей внутри сосуда Q_d , обратный ток через насос Q_n . Тогда, приравнявая убыль газа из сосуда (с точностью до RT/μ) в единицу времени $-V dP$ и сумму перечисленных токов? имеем:

$$-VdP = (PW - \sum_i Q_i) dt \quad (1)$$

При достижении предельного вакуума устанавливается давление P_{np} , и $dP = 0$. Тогда:

$$W = (\sum_i Q_i) / P_{np} \quad (2)$$

Поскольку обычно Q_i постоянно, а Q_n и Q_d слабо зависят от времени, также считая постоянной W , можем проинтегрировать (1) и получить:

$$P - P_{np} = (P_0 - P_{np}) \exp\left(-\frac{W}{V} t\right) \quad (3)$$

Полная скорость откачки W , собственная скорость откачки насоса W_n и проводимости элементов системы C_1, C_2, \dots соотносятся согласно формуле (4), и это учтено в конструкции установки.

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_n} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (4)$$

2.2 Течение газа через трубу

Характер течения газа существенно зависит от соотношения между размерами системы и длиной свободного пробега молекул. При атмосферном и форвакуумном давлениях длина свободного пробега меньше диаметра трубок, и течение газа определяется его вязкостью, т.е. взаимодействием молекул. При высоком вакууме течение существеннее определяется взаимодействием со стенками. Для количества газа, протекающего через трубу длины l и радиуса r в условиях высокого вакуума, справедлива формула:

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3} r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{l} \quad (5)$$

Если труба соединяет насос установку, то давлением P_1 у насоса можно пренебречь. Давление в сосуде $P = P_2$. Тогда имеем:

$$C_{mp} = \left(\frac{dV}{dt} \right)_{отн} = \frac{4}{3} r^3 \sqrt{\frac{2 \pi R T}{\mu}} \quad (6)$$

Для пропускной способности отверстий имеется формула

$$C_{mp} = \left(\frac{dV}{dt} \right)_{отн} = S \frac{\vec{v}}{4} \quad (7)$$

Для воздуха при комнатной температуре $v/4 = 110 \text{ м/с} = 11 \text{ л/с} \cdot \text{см}^2$

3. Ход работы

3.1 Измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1. Запускаем атмосферу в сосуд $V = 50 \text{ см}^3$
2. Откачиваем установку и подготавливаем масляный манометр к работе.
3. Открываем кран и записываем высоту столбов масла, после чего открываем кран в ВБ и опять снимаем показания. Результаты в таблице:

h1, см	h2, см	h3, см	h4, см
32,25	6,5	27	11

$\sigma h = 0,25 \text{ см}$ (пол цены деления)

4. Рассчитываем объёмы по закону Бойля-Мариотта. $\rho = 885 \text{ кг/м}^3$, $P_0 = 10^5 \text{ Па}$:

$$V_{\Phi Б} = \frac{P_0 V_0}{(h_1 - h_2) \rho g} - V_0$$

$$V_{ВБ} = \frac{h_1 - h_2}{h_3 - h_4} (V_{\Phi Б} + V_0) - V_{\Phi Б} - V_0$$

	л	σV , л	ϵV
ФБ	2,21	0,04	0,02
ВБ	1,38	0,05	0,04

3.2 Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

5. Откачиваем установку до необходимого вакуума и включаем диффузионный насос.
6. Включаем термопарный манометр.
7. Измеряем $P_{пр} = 5,2 \cdot 10^5$ торр.
8. Ухудшаем вакуум после чего продолжаем откачку и снимаем зависимость P от времени по улучшению вакуума.

Приведем таблицу логарифмов отношений давлений причем не будем пренебрегать P_0

	$\ln((P-P_{пр})/(P_0-P_{пр}))$	
t,с	I	II
0	0,0000	0,0000
1	0,3254	0,2829
2	0,4626	0,4499
3	0,6217	0,6506
4	0,8109	0,8668
5	0,9209	1,1431
6	1,0445	1,2384
7	1,0986	1,4009
8	1,2481	1,5261
9	-	1,6692
10	-	1,8362
11	-	1,9315

Построим зависимость представленную в таблице. Она представляет собой прямую. Подсчитаем по МНК коэффициент наклона

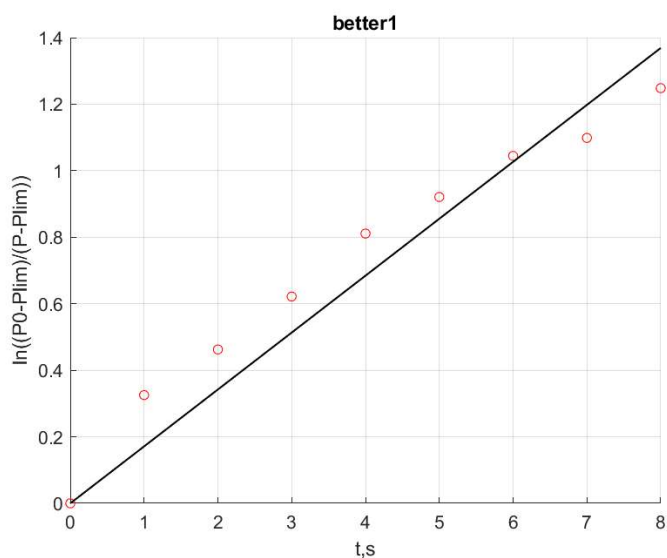


Рисунок 7 - улучшение 1

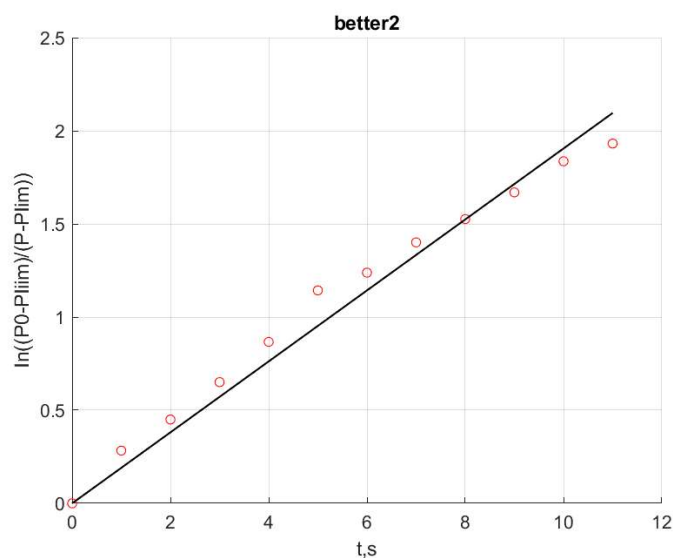


Рисунок 8 - улучшение 2

	$\langle x \rangle$	$\langle y \rangle$	$\langle xy \rangle$	$\langle x^2 \rangle$	$\langle y^2 \rangle$
Better 1	4	0,72	3,87	22,67	0,67
Better 2	5,5	1,08	8,03	42,17	1,54

	$W/V, c^{-1}$	$\sigma W/V, c^{-1}$	$\epsilon W/V, \%$
Better 1	0,17	0,007	4,2
Better 2	0,19	0,004	2,28

s

$$\langle \frac{W}{V} \rangle = 0,18 c^{-1}; \sigma \langle \frac{W}{V} \rangle = \sqrt{\frac{\sum \sigma^2 \langle \frac{W}{V} \rangle}{N(N-1)}} = 0,006 c^{-1}; \epsilon \langle \frac{W}{V} \rangle = 0,04$$

$$W = \langle \frac{W}{V} \rangle * V_{BB} = 0,25 \frac{\mu}{c}; \epsilon W = \epsilon \langle \frac{W}{V} \rangle + \epsilon V_{BB} = 0,07; \sigma W = 0,02 \frac{\mu}{c}$$

$$W = (0,25 \pm 0,02) \frac{\mu}{c}$$

9. Теперь снимаем зависимость ухудшения вакуума от времени.

t, c	P, torr	
-	I	II
0	6,70E-05	6,00E-05

10	1,40E-04	1,20E-04
20	2,10E-04	1,90E-04
30	2,80E-04	2,50E-04
40	3,50E-04	3,10E-04
50	4,20E-04	3,70E-04
60	4,80E-04	4,30E-04
70	5,50E-04	4,90E-04
80	6,00E-04	5,40E-04
90	6,70E-04	6,00E-04
100	7,30E-04	6,50E-04
110	7,90E-04	7,10E-04
120	-	7,70E-04

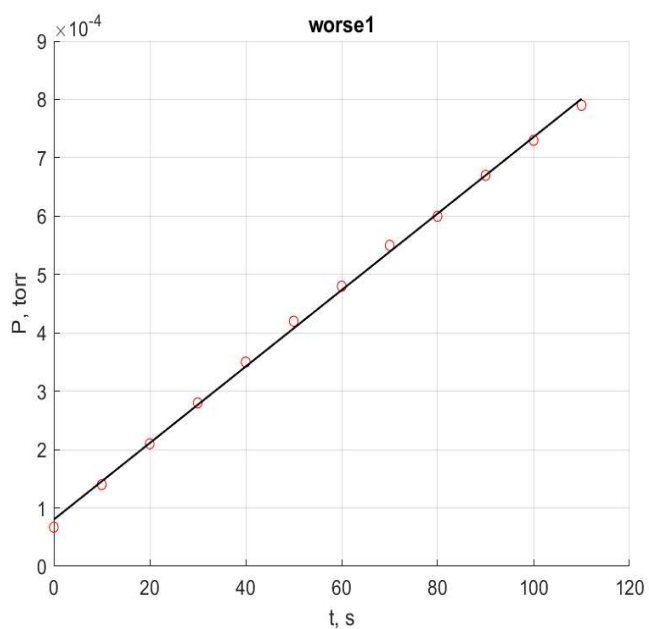


Рисунок 9 - ухудшение 1

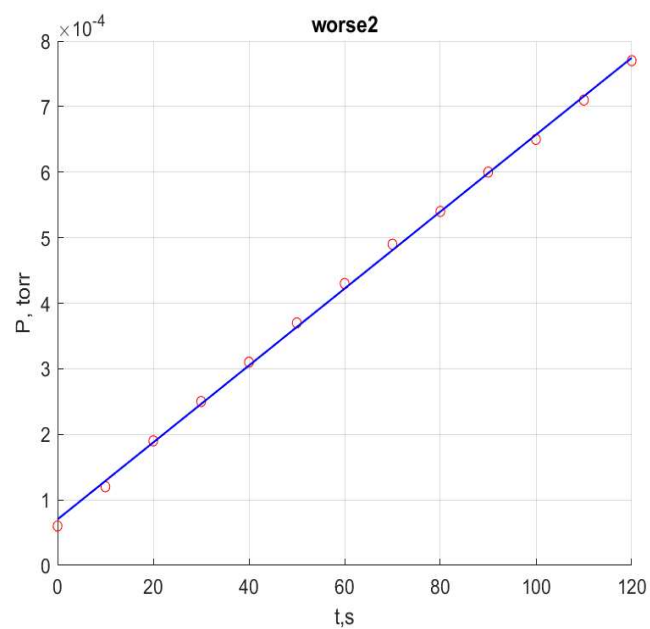


Рисунок 10 - ухудшение 1

	dP/dt , torr/c	$\sigma dP/dt$, torr/c
Worse 1	6.5535e-06	6.6725e-08
Worse 2	5.8681e-06	4.6622e-08

$$\left\langle \frac{dP}{dt} \right\rangle = 6,2 \frac{\text{torr}}{c}; \sigma \left\langle \frac{dP}{dt} \right\rangle = \sqrt{\frac{\sum \sigma^2 \left\langle \frac{dP}{dT} \right\rangle}{N(N-1)}} = 0,3 \frac{\text{torr}}{c}; \epsilon \left\langle \frac{dP}{dt} \right\rangle = 0,06$$

По формуле (1) при $W = 0$:

$$V_{BB} dP = (Q_{\partial} + Q_u) dt \quad ; \quad Q_n = P_{np} W - (Q_{\partial} + Q_u) = P_{np} W - V_{BB} \frac{dP}{dt}$$

$$Q_n = 4,3 \frac{\text{torr} \cdot \text{л}}{\text{с}} \quad \sigma Q_n = 2,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{torr} \cdot \text{л}}{\text{с}}$$

$$Q_n = (4 \pm 2) \frac{\text{torr} \cdot \text{л}}{\text{с}} \quad \epsilon Q_n = 0,5$$

10. Рассчитаем пропускную способность капилляра по формуле:

$$C = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2 \pi R T}{\mu}} = 0,62 \text{ л} \quad , \text{ где } r = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м, } L = 10 \text{ см, } \mu = 0,028 \text{ кг/м}^3$$

$$C = 0,62 \text{ л/с}$$

Это меньше, чем W .

11. Посчитаем W другим способом

$$P_{np} W = Q_1;$$

$$P_{уст} W = \frac{d(PV)_{\text{капилляра}}}{dt}$$

$$\frac{d(PV)_{\text{капилляра}}}{dt} = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2 \pi R T}{\mu}} (P_2 - P_1) \quad , \text{ где } P_2 = 10^{-4} \text{ torr, } P_1 = P_{уст}$$

$$W = \frac{4}{3} \frac{r^3}{L} \sqrt{\frac{2 \pi R T}{\mu}} \frac{P_2 - P_1}{P_{уст} - P_{np}} = 0,19 \pm 0,4 \frac{\text{л}}{\text{с}} \quad \epsilon W = 0,21$$

это значение близко к измеренному до этого.