

Лабораторная работа 2.2.1.

Герасименко Д.В.

1 курс ФРКТ, группа Б01-104

Аннотация

Тема:

Получение и измерение вакуума

Цели работы:

- 1) Измерение объёмов форвакуумной и высоковакуумной частей установки
- 2) Достижение высокого вакуума в $\sim 10^{-5}$
- 3) Определение скорости откачки системы в стационарном режиме, а также по ухудшению и по улучшению вакуума

Необходимое оборудование:

Вакуумная установка с манометрами: масляными, термометрическими и ионизационными

Теория

По степени разрежения вакуумные установки принято делить на три класса: низковакуумные — до 10^{-2} — 10^3 торр; высоковакуумные — 10^{-4} — 10^{-7} торр; установки сверхвысокого вакуума — 10^{-8} — 10^{-11} торр.

Метод и экспериментальная установка

Метод

Метод откачки состоит из двух фаз: фазы с форвакуумным насосом (откачивание до $\sim 10^{-2}$ торр) и фазы совместного откачивания форвакуумного насоса и диффузионного (до $\sim 10^{-5}$ торр).

Экспериментальная установка

Плотности веществ: масло $\rho_m = 940 \text{ кг} \cdot \text{см}^{-3}$; ртуть $\rho_{hg} = 13550 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$

Параметры трубки: $d_{kap} = 0,8 \text{ см}$; $L = (10,8 \pm 0,1) \text{ см}$

Схема экспериментальной установки выглядит следующим образом:

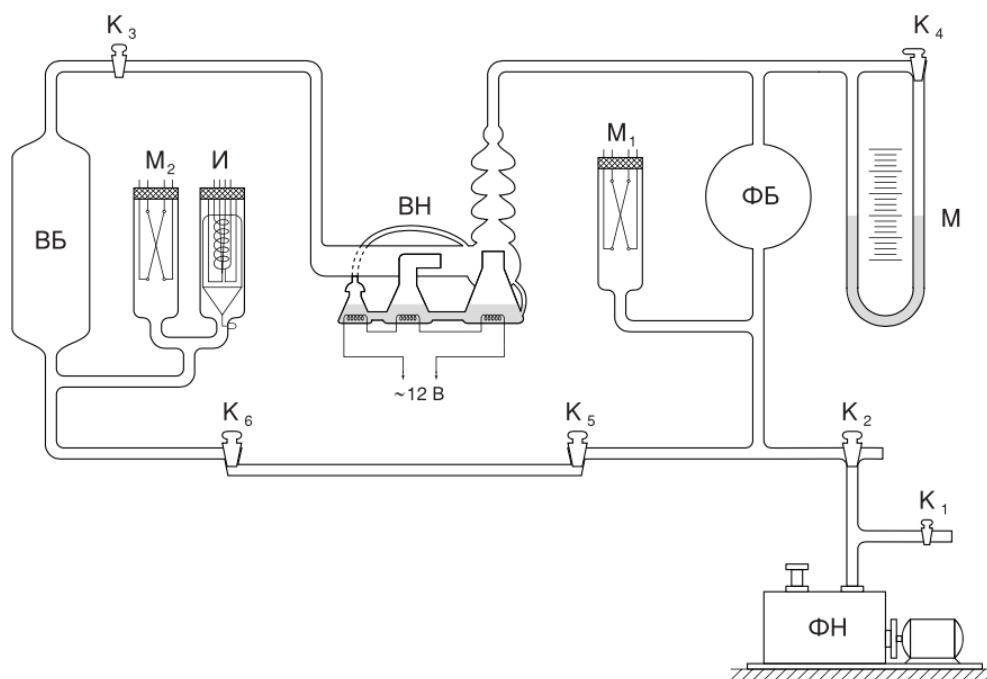


Рис. 1. Вакуумная установка.

Форвакуумный насос

Действие насоса ясно из изображенных на рис. 2 последовательных положений пластин при вращении ротора по часовой стрелке. В положении «а» газ из откачиваемого объема поступает в пространство между пластиной «А» и линией соприкосновения корпуса и ротора. По мере вращения это пространство увеличивается (рис. 2 б), пока вход в него не перекроет другая пластина «Б» (рис. 2 в). После того как пластина «А» пройдет выходное отверстие и линию соприкосновения (рис. 2 г), лопасть «Б» будет сжимать следующую порцию газа и вытеснять его через клапан в атмосферу.

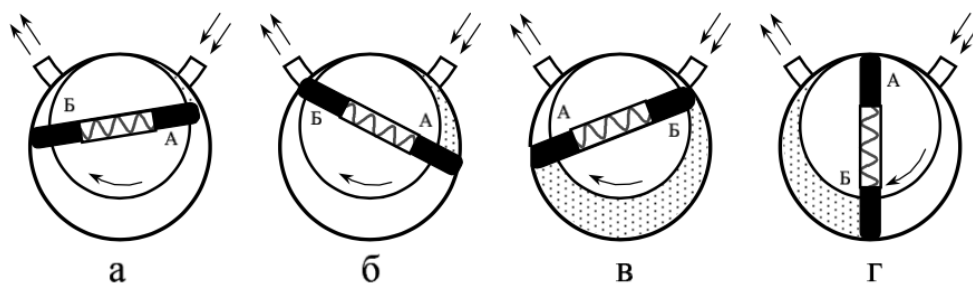


Рис. 2. Схема работы форвакуумного насоса.

Диффузионный насос

Откачивающее действие диффузионного насоса состоит в следующем: попавшие в струю молекулы газа увлекаются ею и уже не возвращаются назад; на их месте образуется пустота, которая немедленно заполняется следующими порциями газа, увеличивая степень разрежения газа в окрестности струи.

Пары масла выходят за счет подогрева масла спиралью, по которой пущен переменный ток. Диффузионный насос, используемый в нашей установке (см. рис. 1), имеет две ступени и соответственно два сопла. Одно сопло вертикальное (первая ступень), второе сопло горизонтальное (вторая ступень). Легколетучие фракции масла,

испаряясь, поступают в первую ступень, обогащая ее легколетучей фракцией масла. По этой причине плотность струи первой ступени выше и эта ступень начинает откачивать при более высоком давлении в форвакуумной части установки. Вторая ступень обогащается малолетучими фракциями. Плотность струи второй ступени меньше, но меньше и давление насыщенных паров масла в этой ступени. Соответственно в откачиваемый объем поступает меньше паров масла и его удастся откачать до более высокого вакуума, чем если бы мы работали только с одной ступенью.

Термопарный манометр

Чувствительным элементом манометра является платино-платинородиевая термопара, спаянная с никелевой нитью накала и заключенная в стеклянный баллон. По нити накала НН пропускается ток постоянной величины.

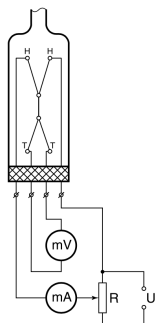


рис.3. Схема устройства термопарного манометра

Для установки тока служит потенциометр R — «Рег. тока накала», расположенный на передней панели вакуумметра. Термопара ТТ присоединяется к милливольтметру 1, 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)

Ионизационный манометр

Схема ионизационного манометра изображена на рисунке 4. Он представляет собой трехэлектродную лампу. Электроны испускаются накалившимся катодом и увлекаются электрическим полем к аноду, имеющему вид редкой спирали. Проскакивая за ее витки, электроны замедляются полем коллектора и возвращаются к катоду, а от него вновь увлекаются к аноду. Прежде чем осесть на аноде, они успевают много раз пересечь пространство между катодом и коллектором. На своем пути электроны ионизуют молекулы газа. Ионы, образовавшиеся между анодом и коллектором, притягиваются полем коллектора и определяют его ток.

Ионный ток в цепи коллектора пропорционален плотности газа и поэтому может служить мерой давления.

Накаленный катод ионизационного манометра перегорает, если давление в системе превышает $1 \cdot 10^3$ торр. Поэтому включать ионизационный манометр можно, только убедившись по термопарному манометру, что давление в системе не превышает 103 торр

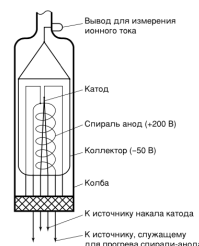


рис.3. Схема устройства термопарного манометра

Процесс откачки

Производительность насоса определяется скоростью откачки /. В нашем случае основное уравнение процесса откачки принимает вид:

$$-VdP = (PW - Q_n - Q_d - Q_t) dt \quad (1)$$

При достижении предельного вакуума реализуется случай:

$$\frac{dP}{dt} = 0 \quad (2)$$

Из этого находим:

$$W = \frac{\sum Q_i}{P} \quad (3)$$

Проинтегрировав уравнение (1) получим экспоненциальную зависимость давления откачки от времени, с помощью которой найдем производительность насоса:

$$P = P_0 e^{-\frac{W}{V}t} + P_{pr} \quad (4)$$

Закон сложения пропускных способностей аналогичен закону сложения проводимостей³. При последовательном соединении элементов:

$$\frac{1}{W} = \frac{1}{W_n} + \sum \frac{1}{C_i} \quad (5)$$

где C_i - пропускные способности частей системы, а W_n - скорость собственной откачки насоса.

Течение через трубу

Для количества газа, протекающего через трубу в условиях высокого вакуума или, как говорят, в кнудсеновском режиме, справедлива формула:

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3}r^3 \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \cdot \frac{P_2 - P_1}{l} \quad (6)$$

Тогда пропускная способность трубы:

$$C = (dV/dt) = \frac{4r^3}{3L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{\mu}} \quad (7)$$

Выполнение и обработка результатов

Определение форвакуумной и высоковакуумной частей установки

1) Откроем все краны установки и впустим атмосферный воздух через краны K_1 и K_2 .

2) Закроем объём воздуха между кранами K_5 и K_6 . Включим форвакуумный насос и после установления давления $\sim 10^{-2}$ торр отсоединим высоковакуумную часть от установки, перекрыв кран 3.

3) Закроем кран 4 и откроем кран 5. Измерим давление ранее запертого воздуха с помощью маслянистого манометра. Найдем объём форвакуумной части установки V_{fv} .

4) Проведем те же манипуляции, не закрывая доступ воздуха к высоковакуумной части установки. Найдя общий объём установки и зная объём форвакуумной части найдем их разность и получим объём высоковакуумной части V_{vv} .

Формула для вычисления объема частей установки:

$$P_0 \cdot V_0 = P_{fv} \cdot V_{fv}; P_{fv} = \frac{\rho_{oil}}{\rho_{hg}} \cdot \rho_{hg} g \Delta h_{fv} \quad (8)$$

Аналогично для всего объема установки. Проведем измерения получим

Начальное давление: $P_0 = 756$;

Начальный объём: $V_0 = (50,1 \pm 0,1) \text{ см}^3$
 Достигнутое при откачивании давление: $P_{vac} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт ст};$
 Перепад уровней масла в форвакуумной части: $\Delta h_{fv} = (268 \pm 1) \text{ мм}$
 Установившееся в форвакуумной части давление: $P_{fv} = (18,4 \pm 0,2) \text{ торр} = (2432 \pm 5) \text{ Па}$
 Объем форвакуумной части сосуда: $V_{fv} = (2058 \pm 5) \text{ см}^3$
 Перепад уровней масла сосуда: $\Delta h_{fv} = (172 \pm 1) \text{ мм}$
 Установившееся давление: $P_{sum} = (11,9 \pm 0,2) \text{ торр} = (1578 \pm 5) \text{ Па}$
 Суммарный объём частей сосуда: $V_{sum} = (3182 \pm 5) \text{ см}^3$
 Объемы высоковакуумной части сосуда: $V_{vv} = (1124 \pm 5) \text{ см}^3$

Получение высокого вакуума и измерение скорости откачки

- 1) Откачаем установку форвакуумным насосом и включим термопары. Нагреем масло до кипения
- 2) Не выключая форвакуумного насоса, включим диффузионный насос при давлении $\sim 10^{-2} \text{ торр}$.
- 3) Включим ионизационный манометр и запишем предельное достигнутое давление.
- 4) Зафиксируем зависимость давления от времени откачки и занесем данные в таблицы

Таблица 2. Измерение давления при улучшении вакуума													
t, с	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80	90
P, 10^{-5} торр	24	28	33	37	41	45	48	52	55	60	63	71	78
$\ln((P - P_{pr})/P_0)$	14,96498	14,81083	14,64652	14,53211	14,42946	14,33637	14,27183	14,19179	14,1357	14,04868	13,99989	13,88035	13,78632

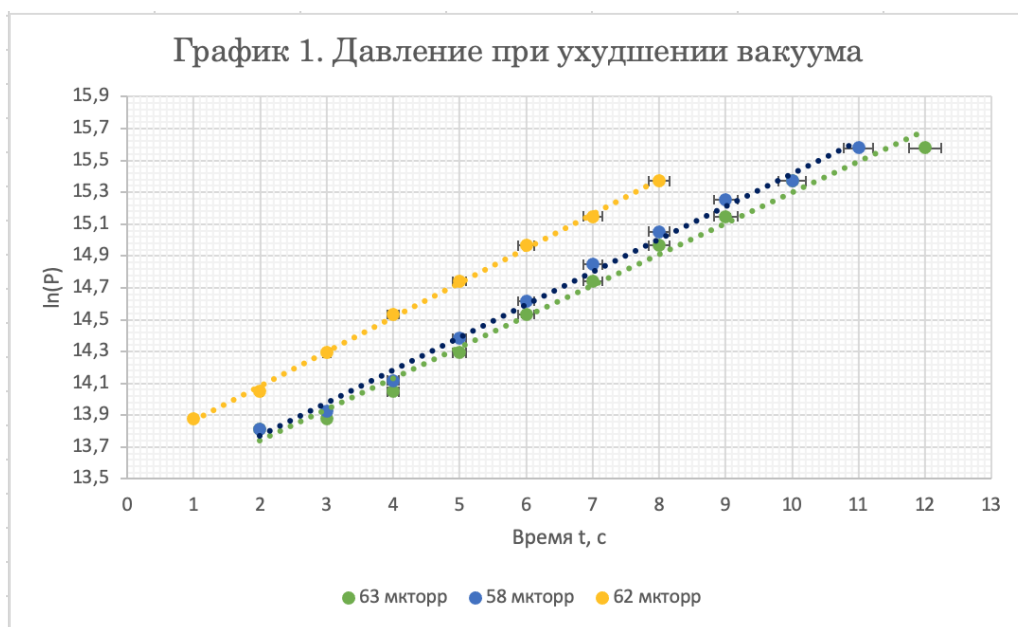
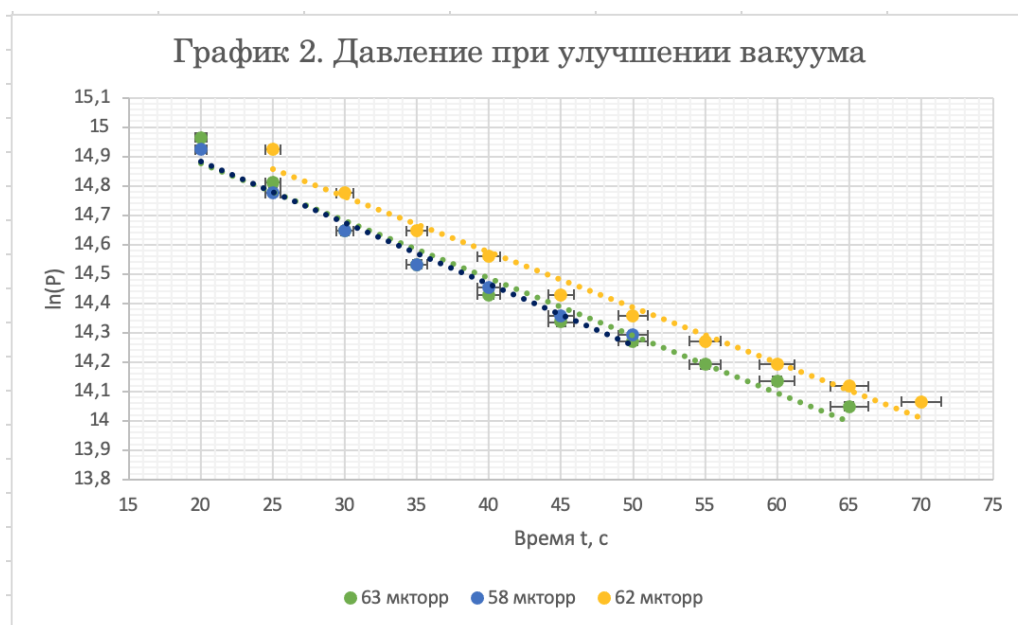
t, с	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	100
P, 10^{-5} торр	18	22	25	29	33	37	40	44	47	55	62	69	75
$\ln((P - P_{pr})/P_0)$	15,25266	15,05199	14,92415	14,77573	14,64652	14,53211	14,45415	14,35884	14,29288	14,1357	14,01589	13,90892	13,82554

t, с	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	80	90	100
P, 10^{-5} торр	25	29	33	36	41	44	48	52	56	59	67	74	82
$\ln((P - P_{pr})/P_0)$	14,92415	14,77573	14,64652	14,55951	14,42946	14,35884	14,27183	14,19179	14,11768	14,06549	13,93834	13,83896	13,73631

Таблица 1. Изменение давления при ухудшении вакуума														
t, с	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	20	25
P, 10^{-5} торр	76	71	60	47	37	30	24	20	16	13	10	9	7	6
$\ln((P - P_{pr})/P_0)$	13,8123	13,88035	14,04868	14,29288	14,53211	14,74183	14,96498	15,1473	15,37044	15,57808	15,84045	15,94581	16,19713	16,35128

t, с	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P, 10^{-5} торр	76	68	56	43	34	27	22	18	16	13	12	10	9	8
$\ln((P - P_{pr})/P_0)$	13,8123	13,92352	14,11768	14,38183	14,61667	14,84719	15,05199	15,25266	15,37044	15,57808	15,65813	15,84045	15,94581	16,06359

t, с	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15
P, 10^{-5} торр	79	75	71	60	47	37	30	24	20	16	13	11	10
$\ln((P - P_{pr})/P_0)$	13,77358	13,82554	13,88035	14,04868	14,29288	14,53211	14,74183	14,96498	15,1473	15,37044	15,57808	15,74514	15,84045



Обработаем данные графиков по методу наименьших квадратов и найдем значение производительности системы W . Результаты занесем в таблицу.

$P_{pr}, 10^{-5}$ торр	$k_{down}, 10^{-5} \cdot c^{-1}$	$k_{up}, 10^{-6} \cdot c^{-1}$
6,3	$0,12 \pm 0,01$	$-(0,15 \pm 0,01)$
5,8	$0,17 \pm 0,01$	$-(0,17 \pm 0,01)$
6,2	$0,16 \pm 0,01$	$-(0,15 \pm 0,01)$

Табл. 3. Угловые коэффициенты прямых зависимостей

Давление, 10^{-5} торр	$\frac{W}{V_{vv}}, \text{ с}^{-1}$	W, л/с	$\sigma_W, \text{ л/с}$
6,3	$0,12 \pm 0,01$	0,135	0,011
5,8	$0,17 \pm 0,01$	0,191	0,016
6,2	$0,16 \pm 0,01$	0,179	0,015

Табл. 4. Производительность откачки при ухудшении вакуума

Давление, 10^{-5} торр	$\frac{W}{V_{vv}}, 10^{-1} \text{ с}^{-1}$	W, л/с	$\sigma_W, \text{ л/с}$
6,3	$0,15 \pm 0,01$	0,017	0,001
5,8	$0,17 \pm 0,01$	0,019	0,002
6,2	$0,15 \pm 0,01$	0,017	0,001

Табл. 5. Производительность откачки при улучшении вакуума

Оценка величины потока, поступающего из насоса назад в откачиваемую систему

При закрытии крана 3 единственные потоки в высоковакуумной части - потоки десорбции с поверхности и через течи (Q_d и Q_t соответственно). Поэтому из основного уравнения, описывающего процесс откачки получим:

$$V_{vv} dP = (Q_d + Q_t) dt \quad (9)$$

Оценка производительности насоса с помощью искусственной течи

Зафиксируем предельное значение давления, после чего откроем кран 6, введя таким образом искусственную течь в систему. Измерим установившееся давление в форвакуумной части установки. Данные о капиллярной трубке:

$$d_{kap} = 0,8 \text{ см} ; \quad L = (10,8 \pm 0,1) \text{ см}$$

Установившееся и предельное давления:

$$P_{pr} = (5,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-5} \text{ торр} ; \quad P' = (1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \text{ торр}$$

Тогда количество газа, протекающего через капилляр:

$$\frac{d(PV)}{dt} = \frac{4}{3} r^3 \sqrt{\frac{2\pi R T}{\mu}} \cdot \frac{P'}{L} \quad (10)$$

При закрытом и открытом кране 6 реализуются следующее пропускное распределение:

$$P_{pr} W = Q_1; \quad P' W = Q_1 + \frac{d(PV)}{dt} \quad (11)$$

Исключая натекание Q_1 , получим значение производительности:

$$W = \frac{P'}{P' - P_{pr}} \cdot \frac{4r^3}{3L} \sqrt{\frac{2\pi R T}{\mu}} \approx \frac{4r^3}{3L} \sqrt{\frac{2\pi R T}{\mu}} = 0,018 \text{ л/с} \quad (12)$$

Соответственно погрешность которой можно оценить как: $\varepsilon_W = \sqrt{\varepsilon_L^2 + 2 \cdot \varepsilon_P} = 14\%$

Откуда получаем значение производительности:

$$W = (0,018 \pm 0,003) \text{ л/с}$$

Что входит в интервал значений производительности, полученных путем исследования улучшения вакуума.

Вывод и обсуждение результатов работы

1) С достаточной точностью были определены объёмы всех частей вакуумной установки:

$$V_{fv} = (2058 \pm 5) \text{ см}^3 ; V_{vv} = (1124 \pm 5) \text{ см}^3$$

2) Было найдено значение производительности насоса 2мя способами: с помощью установления искусственной течи и по изменению состояния вакуума. Значения, полученные обоими способам совпадают в пределах погрешности друг друга.

3) Подтвержден линейный характер зависимостей $\ln(P)(t)$.

4) Наибольшая достигнутая погрешность составляет 14%, что для данной лабораторной работы можно считать успехом.