

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОСТИКА «УИТСТОНА»

Цель работы: ознакомиться с принципом работы измерительной мостовой схемы и экспериментально определить величины неизвестного сопротивления.

Приборы и принадлежности: источник постоянной ЭДС; магазин сопротивлений; неизвестные сопротивления (три пары – $R_{1,x}$, $R_{2,x}$); реохорд; гальванометр; ключ; мост постоянного тока типа ММВ; авометр (тестер) любого типа.

Методические указания и описание установки

Одним из наиболее точных способов измерения сопротивлений является метод мостика Уитстона. Принципиальная схема представляет собой замкнутый прямоугольник, образованный сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , R_4 (рис. 1). В диагональ AC подсоединяется источник постоянного тока ε , а в диагональ BD , образующую «мост», нуль-гальванометр G . Сопротивления R_1 , R_2 , R_3 , R_4 называются *плечами моста*. При произвольно выбранных сопротивлениях R_1 , R_2 , R_3 , R_4 в диагонали BD будет идти ток, вызывающий отклонение стрелки гальванометра в ту или другую сторону. Величина этого тока определяется по закону Ома:

$$I_g = \frac{\varphi_B - \varphi_D}{r_g},$$

где φ_B и φ_D – потенциалы в точках B и D ; r_g – сопротивление гальванометра.

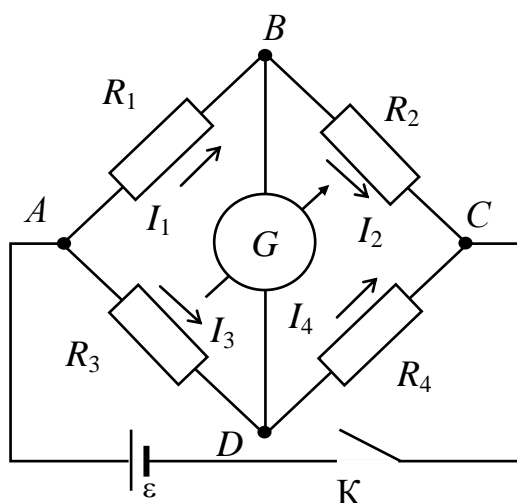


Рис. 1. Схема мостика Уитстона

Подбирая определённые соотношения сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4 , можно добиться отсутствия тока в цепи гальванометра ($I_g = 0$).

Это означает, что потенциалы точек B и D одинаковы, т.е. $\varphi_B = \varphi_D$. В этом случае мост называют *сбалансированным*.

Токи, текущие через сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4 , обозначим соответственно I_1, I_2, I_3, I_4 . Для нахождения соотношения между этими сопротивлениями запишем закон Ома для каждого из участков цепи (с учётом направления токов) через разности потенциалов на концах соответствующих сопротивлений:

$$I_1 R_1 = \varphi_A - \varphi_B; \quad (1)$$

$$I_3 R_3 = \varphi_A - \varphi_D; \quad (2)$$

$$I_2 R_2 = \varphi_B - \varphi_C; \quad (3)$$

$$I_4 R_4 = \varphi_D - \varphi_C. \quad (4)$$

При условии $I_g = 0$, когда $\varphi_B = \varphi_D$, в уравнениях (1), (2) и (3), (4) правые части равны, следовательно, равны и левые части:

$$I_1 R_1 = I_3 R_3, \quad (5)$$

$$I_2 R_2 = I_4 R_4. \quad (6)$$

Для последовательно соединённых сопротивлений R_1 и R_2 , R_3 и R_4 и отсутствия тока в диагонали BD имеем $I_1 = I_2$ и $I_3 = I_4$. Разделив почленно уравнение (5) на (6), получаем:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \text{ или } R_1 R_4 = R_2 R_3, \quad (7)$$

откуда, например,

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4}. \quad (8)$$

Уравнения (5) и (6) называются уравнениями сбалансированного моста, а уравнение (7) – *условием равновесия*.

В настоящей работе используется установка, электрическая схема которой показана на рис. 2. Сопротивление R_1 заменено неизвестным сопротивлением R_x , величину которого нужно определить; вместо постоянного резистора R_2 включён магазин сопротивлений R_m , позволяющий менять значение этого сопротивления в широком диапазоне; сопротивления R_3 и R_4 заменены единой эталонированной проволокой ADC (её сечение одинаково по всей длине) – *реохордом*.

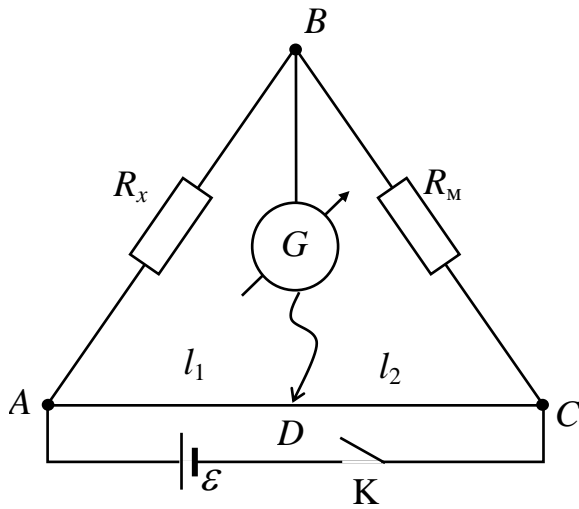


Рис.2. Схема рабочей установки

Движок D , перемещаясь по реохорду, меняет плечи мостика R_3 и R_4 . Так, сопротивление однородного цилиндрического проводника

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление; l – длина и S – сечение проволоки реохорда. При постоянных ρ и S сопротивление R пропорционально длине l и отношение сопротивлений R_3 / R_4 в уравнении (7) будет эквивалентно отношению плеч реохорда, т.е.

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{l_1}{l_2}. \quad (9)$$

В итоге, уравнение (8) для расчёта неизвестного сопротивления (R_x) принимает окончательный вид

$$R_x = R_m \frac{l_1}{l_2}. \quad (10)$$

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Работа может быть выполнена в двух вариантах, виртуальном и реальном. Виртуальный выполняется в случае невозможного выполнения реального варианта.

1. Вариант – виртуальный.

Загрузить из яндекс-диска файл, ссылка <https://yadi.sk/d/8AElskYcjKqnPA>

Если система защиты не позволяет запуск, нажать *Подробнее* и выполнить.

Включить тумблер *Вкл* на виртуальном имитаторе и далее выполнять задания как в реальном варианте. Сопротивление магазина подбирать, нажимая кнопки вверх и вниз.

2. Вариант – реальный.

Задание 1. Определение сопротивления с помощью модели мостика Уитстона.

1. В плечо AB (рис. 2) включите одно из двух заданных преподавателем неизвестных сопротивлений $R_{1,x}$, $R_{2,x}$, например $R_{1,x}$. Движок реохорда поставьте так, чтобы он находился в средней трети длины реохорда. Замкните ключ K , нажав кнопку, и вращением ручек соответствующих декад магазина сопротивлений R_m (исключая X10000) выберите интервал сопротивлений, при котором стрелка гальванометра не зашкаливает ни вправо, ни влево и легко выводится на нуль. Для первоначального положения движка реохорда подбором соответствующего сопротивления декад магазина R_m установите

стрелку на нуль, а полученные значения l_1 и l_2 и соответствующее сопротивление магазина запишите в табл. 1.

2. Измените сопротивление магазина R_m , увеличив или уменьшив его примерно на 10% от первоначального значения. Передвигая движок реохорда при нажатой кнопке ключа, вновь добейтесь нулевого тока в цепи гальванометра и занесите новые значения l_1 , l_2 и R_m в табл. 1. Проведите 5 таких измерений, изменяя каждый раз сопротивление магазина R_m на 10% от предыдущего значения.

3. В этой же последовательности произведите измерения второго неизвестного сопротивления $R_{2,x}$, а затем величины общих сопротивлений $R_{x \text{ посл}}$ и $R_{x \text{ пар}}$ при последовательном и параллельном соединении сопротивлений $R_{1,x}$ и $R_{2,x}$. Данные занесите в табл. 2 – 4.

Таблица 1

$R_{1,x}$	№ п/п	R_m , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	$R_{1,xi}$, Ом	$\Delta R_{1,xi}$, Ом	$R_{1,x} = \bar{R}_{1,x} \pm \Delta \bar{R}_{1,x}$, Ом
$R_{1,x}$	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
			$\bar{R}_{1,x} =$			$\Delta \bar{R}_{1,x} =$	
Результаты из задания 2							
Результаты из задания 3							

Таблица 2

$R_{2,x}$	№ п/п	R_m , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	$R_{2,xi}$, Ом	$\Delta R_{2,xi}$, Ом	$R_{2,x} = \bar{R}_{2,x} \pm \Delta \bar{R}_{2,x}$, Ом
$R_{2,x}$	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
			$\bar{R}_{2,x} =$			$\Delta \bar{R}_{2,x} =$	
Результаты из задания 2							
Результаты из задания 3							

Таблица 3

$R_{x, \text{посл}}$	№ П/П	R_m , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	$R_{xi, \text{посл}}$, Ом	$\Delta R_{xi, \text{посл}}$, Ом	$R_{x, \text{посл}} = R_{x, \text{посл}} \pm$ $\pm \Delta R_{x, \text{посл}}$, Ом
$R_{x, \text{посл}}$	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
			$R_{x, \text{посл}} =$			$R_{x, \text{посл}} =$	
Результаты из задания 2							
Результаты из задания 3							

Таблица 4

$R_{x, \text{пар}}$	№ П/П	R_m , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	$R_{xi, \text{пар}}$, Ом	$\Delta R_{xi, \text{пар}}$, Ом	$R_{x, \text{пар}} = R_{x, \text{пар}} \pm$ $\pm \Delta R_{x, \text{пар}}$, Ом
$R_{x, \text{пар}}$	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
			$R_{x, \text{пар}} =$			$R_{x, \text{пар}} =$	
Результаты из задания 2							
Результаты из задания 3							

4. По формуле (10), используя результаты измерений, рассчитайте по пять значений сопротивлений $R_{1, x}$ и $R_{2, x}$ и найдите их средние значения $R_{1, x}$ и $R_{2, x}$.

5. По формуле (10) аналогично рассчитайте по 5 значений общих сопротивлений при последовательном и параллельном соединении сопротивлений. Найдите их средние значения $R_{x, \text{посл}}$ и $R_{x, \text{пар}}$.

6. Вычислите абсолютные погрешности $\Delta R_{1, xi}$ и $\Delta R_{2, xi}$ для каждого искомого сопротивления, а также абсолютные ошибки общих сопротивлений при последовательном и параллельном включении сопротивлений $\Delta R_{xi, \text{посл}}$ и $\Delta R_{xi, \text{пар}}$. Рассчитайте среднюю абсолютную погрешность для каждого неизвестного сопротивления $\Delta R_{1, x}$, $\Delta R_{2, x}$ и среднюю абсолютную погрешность общих сопротивлений при последовательном и параллельном соединении сопротивлений $\Delta R_{x, \text{посл}}$ и $\Delta R_{x, \text{пар}}$.

7. По найденным средним величинам сопротивлений и средним значениям их абсолютных ошибок рассчитайте для каждого случая относительные погрешности E .

8. Сравните экспериментально полученные значения общих сопротивлений $R_{x, \text{посл}}$ и $R_{x, \text{пар}}$ в табл. 3 и 4 с теоретическими, рассчитываемыми при последовательном и параллельном соединении резисторов.

Задание 2. Определение сопротивления с помощью коммерческого моста постоянного тока типа ММВ.

1. Познакомьтесь с внешним видом и устройством моста ММВ (взять у лаборанта).

2. Подключите неизвестное (из определяемых в задании 1) сопротивление с помощью «крокодилов» или штекеров к клеммам моста.

3. Нажмите на кнопку К включения питания моста и визуально по плавности отклонения стрелки гальванометра в стороны «мало», «много» с помощью переключателя установите диапазон измерений: $\times 1$, $\times 10$, $\times 100$, $\times 1000$, $\times 10\,000$.

4. С помощью ручки реохорда, вращением её по или против часовой стрелки в диапазоне $0,5 \dots 50$ установите стрелку гальванометра на нуль.

5. Величина сопротивления R_x определится диапазоном измерений и соответствующим делением реохорда, установившимся против индикаторной стрелки – на приборе это изображено в виде

$$R_x = \downarrow^{\times} \Omega \rightarrow$$

Результаты измерений занесите в табл. 1 – 4.

Задание 3. Определение сопротивления с помощью ампервольтметра – авометра (тестера).

1. Познакомьтесь с внешним видом и устройством авометра (взять у лаборанта). Установите стрелку на нуль.

2. Подключите неизвестное сопротивление (из определённых в задании 1) с помощью «крокодилов» или штекеров к клеммам прибора.

3. Переключатель рода работы авометра поставьте в положение R_x .

4. Переключатель диапазона измерений поставьте в такое положение, чтобы ошибка измерений была наименьшей (отклонение стрелки наибольшее).

5. Результаты измерения отдельных сопротивлений, их последовательного и параллельного соединений запишите в табл. 1 – 4 и сравните с ранее полученными в заданиях 1 и 2.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрический ток, сила тока, плотность тока?
2. Нарисуйте схему мостика Уитстона и объясните принцип его действия.
3. Объясните как первая схема мостика Уитстона преобразуется во вторую и зачем.
4. Напишите и объясните законы Ома для однородного и неоднородного участков цепи, а также для полной цепи.
5. Запишите и объясните закон Ома в дифференциальной и интегральной форме.
6. Выведите расчётную формулу (9).
7. Получите расчётную формулу (9) с использованием правила Кирхгофа.
8. Зависит ли погрешность измерений от положения движка реохорда?
9. Как зависит электрическое сопротивление проводника от его температуры?
10. Используя классическую теорию электропроводности металлов, получите выражение для удельной электропроводности металлов.
11. Получите закон Джоуля–Ленца в интегральной и дифференциальной формах.

ИЗУЧЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В КОНТУРЕ

Цель работы: изучение влияния параметров колебательного контура на характер электромагнитных колебаний, возникающих в нём, а также приобретение навыков анализа обработки графической информации.

Приборы и принадлежности: электронный генератор кратковременных прямоугольных импульсов; периодически заряжающий конденсатор контура; система различных по ёмкости конденсаторов; батарея из последовательно соединённых катушек индуктивности; набор резисторов; электронный осциллограф; мостик Уитстона (мост постоянного тока типа ММВ); переключатели; ключи.

Методические указания и описание установки

В электрическом колебательном контуре происходят периодические изменения ряда физических величин (тока, напряжения, заряда и др.). Реальный колебательный контур в упрощённом виде состоит из последовательно соединённых конденсатора C , катушки индуктивности L и активного сопротивления R (рис. 1).

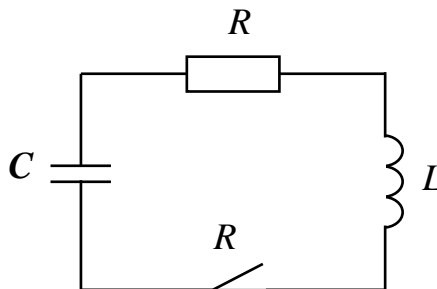


Рис. 1. Схема контура

Если конденсатор зарядить, а затем замкнуть ключ K , он начнёт разряжаться, и в контуре появляется нарастающий ток и пропорциональное ему магнитное поле. Нарастание магнитного поля приводит к возникновению в контуре ЭДС самоиндукции:

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (1)$$

В результате этого (обратите внимание на знак «минус») скорость разряда конденсатора замедляется. После того, как конденсатор полностью разрядится, ЭДС индукции начинает поддерживать ток в прежнем направлении. В итоге происходит перезаряд конденсатора, т.е. первоначально положительно заряженная пластина конденсатора становится отрицательно заряженной и наоборот. Затем процесс разряда начнётся снова, но в обратном направлении. В

цепи возникают повторяющиеся с определённым периодом электромагнитные колебания.

Колебания в электрическом контуре сопоставимы с механическими колебаниями, например, груза на пружине.

Во время колебательного процесса происходит переход энергии из одной формы в другую. При колебаниях груза потенциальная энергия растянутой (или сжатой) пружины переходит в кинетическую энергию движущегося груза. В случае электромагнитных колебаний в контуре при разряде конденсатора его электрическая энергия переходит в энергию магнитного поля тока в катушке. В реальных случаях часть энергии расходуется на так называемые диссипативные процессы. Так, при колебаниях груза амплитуда уменьшается со временем вследствие трения, излучения, т.е. отдачи энергии во внешнюю среду, которую возмущает колеблющийся груз, и других явлений. Амплитуда электромагнитных колебаний также уменьшается вследствие потерь энергии из-за нагрева активного сопротивления, которое всегда присутствует (катушка имеет омическое сопротивление), и излучения электромагнитных волн, так как контур не является идеально закрытым. При небольших частотах колебаний последним фактором можно пренебречь. В результате электромагнитные колебания, так же как и механические, будут затухающими.

Для нахождения уравнения, описывающего характер электромагнитных колебаний в реальном колебательном контуре, можно воспользоваться законом изменения энергии контура во времени:

$$d\left(\frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}\right) = -d(I^2 R dt) = -I^2 R dt, \quad (2)$$

где $q^2/2C$ – энергия электрического поля в конденсаторе; $LI^2/2$ – энергия магнитного поля в катушке индуктивности; $I^2 R dt$ – тепловая энергия, выделяющаяся в активном сопротивлении контура за время dt .

Учитывая, что $I = \frac{dq}{dt}$, из уравнения (2) получаем дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0$$

или, введя обозначения $1/LC = \omega_0^2$, – квадрат собственной циклической частоты колебаний в контуре, $R/2L = \beta$ – коэффициент затухания, получим окончательно уравнение в виде

$$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = 0, \quad (3)$$

которое при условии $\beta^2 < \omega_0^2$ имеет следующее решение:

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

где $q_0 e^{-\beta t} = q(t)$ – амплитуда колебаний заряда конденсатора в момент времени t , q_0 – значение заряда при $t = 0$; φ_0 – начальная фаза колебаний. Циклическая частота затухающих колебаний $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$, отличающаяся от частоты собственных колебаний ω_0 , определяет *условный период* этих колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi / \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad (5)$$

где R , L и C – соответственно активное сопротивление контура, индуктивность катушки и ёмкость конденсатора.

Затухание колебаний характеризуется величиной, называемой *логарифмическим декрементом затухания*:

$$\delta = \ln \frac{q(t)}{q(t+T)} = \beta T, \quad (6)$$

или с учётом выражений для β и T

$$\delta = \pi R / \left(L \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \right) = \pi R / \sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}. \quad (7)$$

В технике качество колебательной системы характеризуется так называемой добротностью θ контура. Добротностью называют физическую величину, равную произведению числа π на количество полных колебаний N , в течение которых амплитуда уменьшается в e раз. Из условия $q_0 e^{-\beta t} / q_0 e^{-\beta(t+NT)} = e$ находим $N = 1/\beta T$. Тогда

$$\theta = \frac{\pi}{\beta T} = \frac{\pi}{\delta} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}. \quad (8)$$

В случае, когда $\beta^2 \geq \omega_0^2$, т.е. $\frac{R^2}{4L^2} \geq \frac{1}{LC}$, выражение для периода колебаний $T = 2\pi / \sqrt{1/LC - R^2/4L^2}$ теряет смысл и периодический процесс в контуре переходит в аperiodический, при этом сопротивление контура

$$R_{\text{кр}} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (9)$$

называется *критическим*.

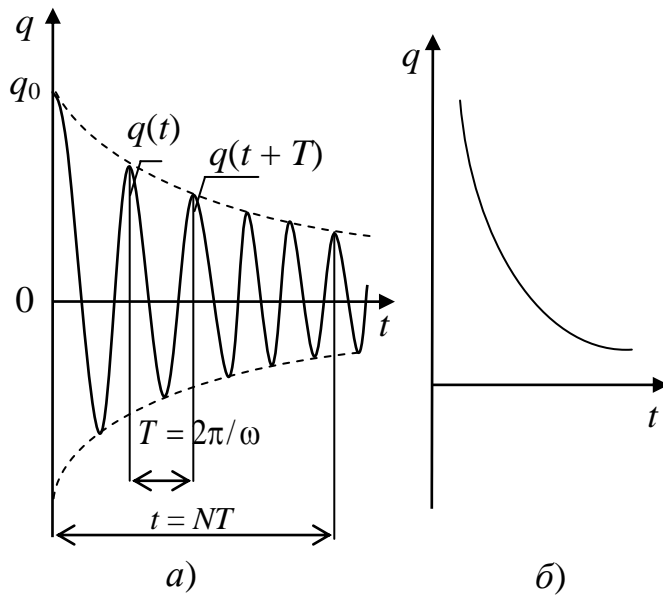


Рис. 2. Графики колебаний

Характер изменения заряда (напряжения) на обкладках конденсатора или тока в катушке индуктивности при затухающих колебаниях и аperiodическом разряде изображён на рис. 2, а, б.

Исследование свободных затухающих колебаний проводится на установке, блок-схема которой показана на рис. 3, а.

Здесь ГИ – генератор кратковременных импульсов, RCL – колебательный контур, состоящий из параллельно соединённых L и C , МУ – мостик Уитстона (типа ММВ), ЭО – электронный осциллограф.

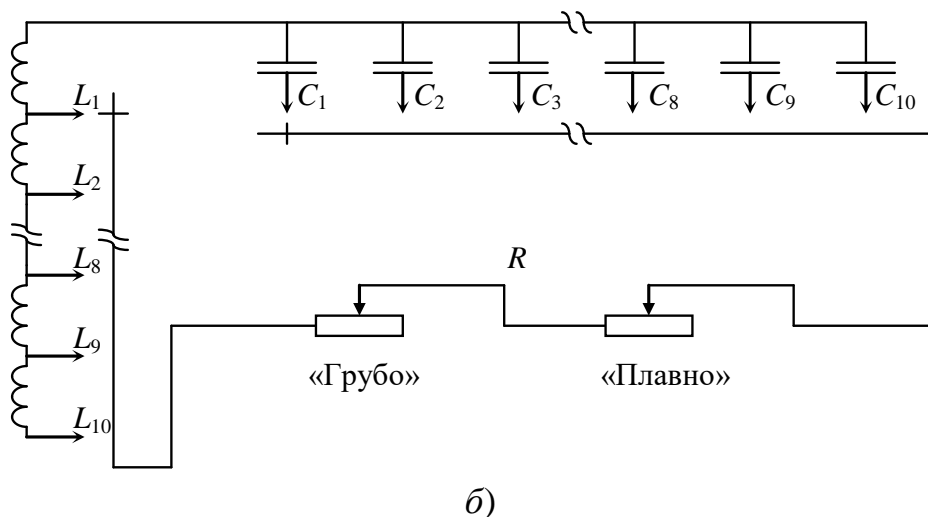
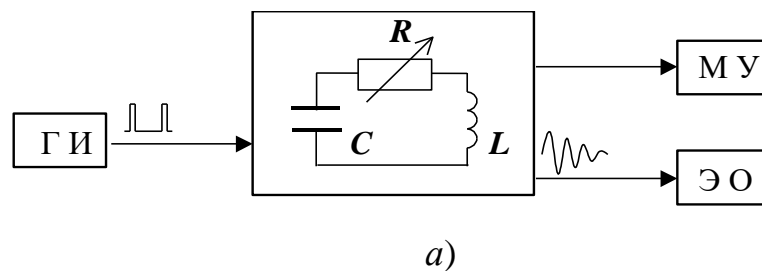


Рис. 3. Электрическая схема установки

Развёрнутая схема колебательного контура дана на рис. 3, б. Варьирование параметрами контура (ёмкостью, индуктивностью и омическим сопротивлением) на установке осуществляется следующим образом: ёмкостью – посредством переключателя «С» в контур вводится один из набора конденсаторов $C_1 - C_{10}$; индуктивность изменяется переключателем «L» путём последовательно-

го подключения к катушке L_1 аналогичных, соединённых между собой катушек в блоке $L_2 - L_{10}$. Например: индуктивность $L_1 = L$, а $L_4 = L + L + L + L = 4L$, $L_6 = 6L$. Активное сопротивление подбирается с помощью переключателей «R» посредством ступенчатого подключения последовательно соединённых резисторов («грубо») и последовательно соединённого с ними переменного резистора («плавно»). Значения ёмкостей и индуктивностей указаны на установке. Величина полного омического сопротивления контура, включая сопротивление обмоток соответствующих катушек индуктивностей, измеряется

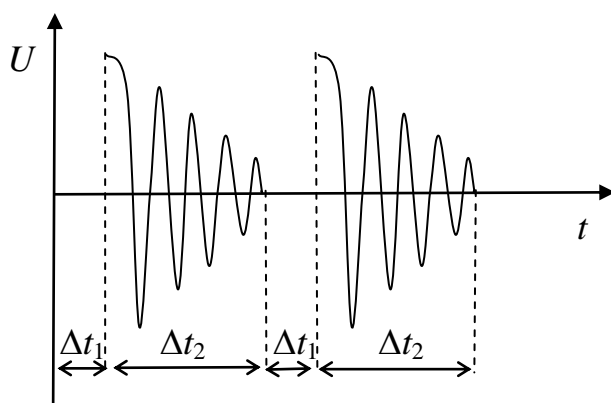


Рис. 4. Импульсы разряда на конденсаторе

встроенным в установку стандартным мостиком Уитстона (МУ).

Заряд конденсатора C_i осуществляется кратковременными (Δt_1) импульсами напряжения с большими промежутками между ними, выдаваемыми генератором импульсов ГИ. В промежутках Δt_2 ($\Delta t_2 \gg \Delta t_1$) происходят затухающие колебания в контуре (рис. 2 а; 4), наблюдаемые на экране осциллографа, подключённого к омическому сопротивлению R .

Амплитуда напряжения на обкладках конденсатора меняется по закону

$$U = U_0 e^{-\beta t},$$

где U_0 – величина амплитудного напряжения в момент времени $t = 0$.

Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Работа может быть выполнена в двух вариантах, виртуальном и реальном. Виртуальный выполняется в случае невозможного выполнения реального варианта.

1. Вариант – виртуальный.

Загрузить из яндекс-диска файл, ссылка <https://yadi.sk/d/Gsb8vtjHrO6YOOQ>

Если система защиты не позволяет запуск, нажать *Подробнее* и выполнить.

Ввести два пробела и построить график. Далее выполнять задания как в реальном варианте. Все параметры контура можно установить на виртуальном имитаторе, а пункты, связанные с подключениями и измерениями реальными приборами пропускаются, но, тем не менее, необходимо изучить действия, выполняемые с реальными приборами и научиться ими пользоваться.

2. Вариант – реальный.

Внимание! Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с устройством колебательного контура установки и схемой подсоединения его элементов, а также с принципами работы электронного осциллографа и мостика Уитстона.

Задание 1. Исследование зависимости периода колебаний от параметров колебательного контура: ёмкости C , индуктивности L , сопротивления R .

Экспериментально период определяется по картине, получаемой на экране электронного осциллографа. Зная цену деления по времени, можно измерить время либо единичного колебания, либо N колебаний. В этом случае период будет равен $T = t/N$ (см. рис. 2, а). Для этого:

1. Подключите сетевой шнур осциллографа, блока питания генератора импульсов (ГИ) и мостика Уитстона (МУ) в сеть 220 В. Нажмите кнопку «POWER» осциллографа и убедитесь, что загорелся индикатор включения сети, замкните ключ K_1 и дайте прогреться элементам установки в течение 2...3 мин. Ключ K_2 блока колебательного контура должен находиться в положении «на себя» (исходное положение).

2. С помощью переключателей установите любое сочетание величин ёмкостей и индуктивностей (C_i, L_i). Внешнее сопротивление контура выведите на нуль ($R = 0$) вращением против часовой стрелки до упора переключателей R «грубо» и «плавно». В контуре останется лишь активное сопротивление подключённой части катушек индуктивности и соединительных проводов.

3. Для получения устойчивой картины затухающих колебаний на экране осциллографа сделайте следующие операции:

а) переключатель режима работы усилителя осциллографа «MODE» установите в положение «CH 1». При этом разъём шнура, подающего сигнал от колебательного контура, должен быть подключён к каналу X (разъём «CH 1») осциллографа, а переключатель режима работы данного канала находится в положении «DC». С помощью переключателя «VOLTS/DIV» (вольт/дел), позволяющего дискретно изменять коэффициент отклонения луча по вертикали (ось Y), установите необходимое усиление сигнала по оси Y для канала «CH 1». Например, если переключатель стоит в положении «2», то одному делению (1 см) координатной сетки экрана по оси Y соответствует величина сигнала, равная 2 В, при этом ручка плавной регулировки коэффициентов усиления «VARIABLE» должна быть установлена в положении «CAL» (калибровка);

б) переключателями и ручками (расположены на правой половине передней панели осциллографа) установите необходимые для данного сигнала режимы синхронизации и развёртки по горизонтали экрана (ось X). Для этого:

- переключатель «MODE» установите в положение «AUTO» или «NORM», а переключатель «TRIGGER SOURCE» в положение «CH 1»;
- установите переключатели, регулирующие растяжку и калибровку времени развёртки исследуемого сигнала по оси X , в положение «X 1» и «CAL», соответственно, т.е. эти кнопки должны быть не нажаты.

С помощью ручки переключателя «TIME/DIV» (время/дел) установите такое время развёртки, при котором на экране отображается необходимое число периодов сигнала. Если периодов много, то уменьшите время развёртки. Например, если переключатель «время/дел» установлен в положение « $mS .1$ », то цена деления (1 см по горизонтали) равна 0,1 миллисекунды;

в) ручками «INTEN», «FOCUS» и «POSITION» отрегулируйте яркость и резкость наблюдаемой осциллограммы сигнала и её расположение относительно центра экрана.

4. Зная цену деления временной развёртки сигнала по оси X (п. 3, б), измерьте период ($T_{\text{эксп}}$) одного полного колебания или время N полных колебаний для данного сочетания значений L и C и разделите это время на число колебаний. Замеренные значения занесите в табл. 1, а полученную осциллограмму сигнала перенесите на кальку.

5. Мостиком Уитстона или цифровым омметром измерьте величину активного сопротивления включённых катушек индуктивности. Для этого ключ K_2 переведите в положение «Вкл. МУ» и одновременным нажатием кнопки и вращением ручки реохорда мостика добейтесь установления стрелки на нуль. По схеме, приведённой на приборе, произведите отсчёт сопротивления и запишите его в табл. 1. Особенность установки: при переключении K_2 колебательный контур отключается от осциллографа, и кривая затухающих колебаний исчезает с экрана. После замера сопротивления ключ K_2 верните в исходное положение.

6. Поочерёдно меняя L_i и C_i , измерьте для каждого из сочетаний период колебаний ($T_{\text{эксп}}$). Мостиком Уитстона измерьте сопротивление контура R_i . Данные занесите в табл. 1, а кривые переведите с экрана на кальку.

7. По формуле (5) рассчитайте теоретические значения периодов ($T_{\text{теор}}$) для всех сочетаний L и C и сравните их с экспериментально измеренными ($T_{\text{эксп}}$). Сделайте выводы о влиянии каждого из параметров на период затухающих колебаний.

Таблица 1

№ п/п	L_i , мГн	C_i , нФ	R_{Li} , Ом	N	$t \times 10^{-5}$, с	$T_{\text{эксп}} \times 10^{-5}$, с	$T_{\text{теор}} \times 10^{-5}$, с	E_T , %
1								
2								
3								
4								

8. Определите погрешности в оценке периодов $E_T = \left| T_{\text{теор}} - T_{\text{эксп}} \right| / T_{\text{теор}}$ данным методом и сделайте выводы о качестве согласования опытных и теоретических значений периодов колебаний в рассматриваемых вариантах.

Задание 2. Определение логарифмического декремента затухания и добротности колебательного контура.

1. Перенесите значения L_i , C_i и R_i из табл. 1 в табл. 2.
2. На полученных в первом задании осциллограммах измерьте амплитуды колебаний, полученные результаты внесите в табл. 2.

3. Сравните полученные осциллограммы колебаний и сделайте выводы о влиянии R , L и C на амплитуду свободных затухающих колебаний.

Таблица 2

№ п/п	L_i , мГн	C_i , нФ	R_i , Ом	$A_t^{\text{эксп}}$	$A_{(t+NT)}^{\text{эксп}}$	$\delta_{\text{эксп}}$	$\delta_{\text{теор}}$	$\theta_{\text{эксп}}$	$\theta_{\text{теор}}$	$E_\delta, \%$	$E_\theta, \%$
1											
...											
4											

4. По полученным значениям амплитуд A_m и A_{m+N} (для соседних колебаний $N = 1$) для разных сочетаний L , C и R определите логарифмические декременты затухания ($\delta_{\text{эксп}}$) и добротности контуров ($\theta_{\text{эксп}}$):

$$\delta_{\text{эксп}} = \frac{1}{n} \ln \frac{A_m}{A_{m+N}}; \quad \theta_{\text{эксп}} = \pi / \delta_{\text{эксп}}.$$

5. По формулам (7) и (8) рассчитайте теоретические значения логарифмических декрементов затухания ($\delta_{\text{теор}}$) и добротности контуров ($\theta_{\text{теор}}$) для тех же сочетаний величин L , C и R . Полученные опытные и теоретические значения занесите в табл. 2.

Оцените погрешности $\frac{|\delta_{\text{теор}} - \delta_{\text{эксп}}|}{\delta_{\text{теор}}}$ и $\frac{|\theta_{\text{теор}} - \theta_{\text{эксп}}|}{\theta_{\text{теор}}}$, с которыми в данной

работе определяются логарифмические декременты затухания и добротности контуров и сделайте выводы о качестве согласования опытных и теоретических значений исследуемых величин.

Задание 3. Определение критического сопротивления колебательного контура при заданных величинах ёмкости и индуктивности.

1. Установите первоначальное значение индуктивности L_i и любую из величин C , за исключением $C_1 - C_4$ (при этих ёмкостях на данной установке нельзя достигнуть апериодического разряда). Постепенно увеличивая сопротивление R , сначала переключателем «грубо», а затем «плавно» переведите колебательный процесс разряда конденсатора в апериодический (рис. 2, б). Такой характер апериодического разряда обусловлен наличием в схеме генератора импульсов электронного ключа, который практически мгновенно отключает контур после выдачи импульса, заряжающего конденсатор. Для большей точности определения момента перехода к апериодическому разряду, заключительную стадию увеличения сопротивления производите с помощью рукоятки «плавно».

2. Мостиком Уитстона замерьте полученное сопротивление, которое и будет критическим ($R_{кр}^{эксп}$) для выбранных значений L и C контура.

3. По формуле (9) рассчитайте теоретическое значение критического сопротивления ($R_{кр}^{теор}$) для использованных величин C и L и внесите его в табл.

3. Сравните опытно полученные значения с теоретическими.

Таблица 3

L , мГн	C , нФ	$R_{кр}^{эксп}$, Ом	$R_{кр}^{теор}$, Ом	$E_{R_{кр}}$, %

5. Рассчитайте погрешности $E_R = \frac{|R_{кр}^{теор} - R_{кр}^{эксп}|}{R_{кр}^{теор}}$ в оценке критических сопротивлений, проанализируйте полученные результаты и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Вывести дифференциальное уравнение, описывающее затухающие электромагнитные колебания в контуре.

2. Что такое период колебаний, логарифмический декремент затухания и добротность контура, их физический смысл? Получить теоретическое соотношение для каждого из них.

3. Что такое апериодический разряд конденсатора, критическое сопротивление, его связь с параметрами контура?

4. Нарисуйте схему используемого в установке колебательного контура и объясните процесс электромагнитных колебаний в нём.

5. Как экспериментально определяются период колебаний, логарифмический декремент затухания, добротность контура и критическое сопротивление?

6. Объясните влияние ёмкости, индуктивности и активного сопротивления контура на характер затухающих колебаний в нём.

7. Составьте дифференциальные уравнения, описывающие свободные незатухающие колебания заряда, тока и напряжения в контуре, запишите решения этих уравнений.

8. Получите выражения, описывающие изменения энергии электрического и магнитного полей в контуре при свободных незатухающих колебаниях.

9. Как соотносятся фазы колебаний тока, напряжения и заряда в колебательном контуре?

10. Приведите примеры использования колебательного контура.

ИЗУЧЕНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ЛАЗЕРНОГО ДИСКА

Цель работы: ознакомление с отражательной дифракционной решеткой, применение ее для определения длин волн линий спектра ртути, а также определение характеристик решетки.

Приборы и принадлежности: лазерный диск (CD, DVD), лазерная указка ($\lambda = 630$ нм), лист ватмана или плотной бумаги, линейка.

Общие сведения и методические указания

Отражательная дифракционная решетка представляет собой металлическую зеркальную пластинку, на которой через одинаковые интервалы d нанесено большое число штрихов. При попадании плоской световой волны на решетку каждый элемент ее поверхности является источником вторичных когерентных волн.

Если на пути дифрагированных волн поставить собирающую линзу, то в ее фокальной плоскости будет наблюдаться дифракционный спектр, состоящий из отдельных максимумов. Эти максимумы возникают в тех направлениях, для которых оптическая разность хода световых волн, отраженных от соответствующих элементов соседних штрихов решетки, равна целому числу длин волн. Данные колебания приходят в определенные точки фокальной плоскости линзы в фазе и, следовательно, максимально усиливают друг друга.

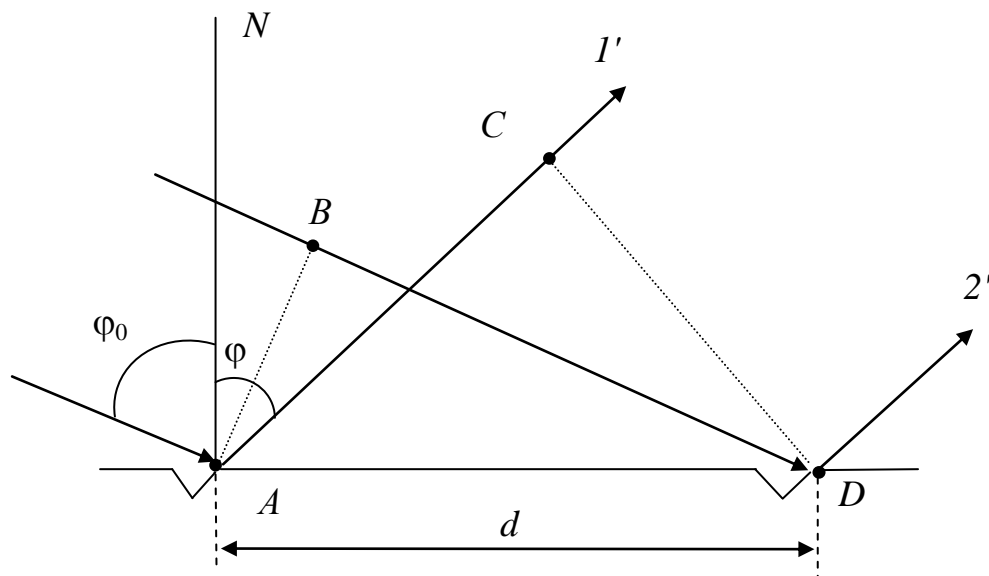


Рис. 1. Ход лучей при отражении от поверхности диска

На рис. 1 видно, что оптическая разность хода Δ лучей I' и $2'$ равна:

$$\Delta = BD - AC = d(\sin \varphi_0 \pm \sin \varphi),$$

\pm – учитывает направление наблюдения максимумов относительно центрального максимума, где φ_0 – угол падения лучей, φ – угол дифракции.

Условие максимума имеет вид: $\Delta = k \cdot \lambda$, где k – порядок дифракционного максимума ($k = 0, 1, 2 \dots$), λ – длина волны света. Таким образом,

$$d \cdot (\sin \varphi_0 \pm \sin \varphi) = k \cdot \lambda, \quad (1)$$

т.е., для монохроматического света максимум интенсивности будет соответствовать углам φ , удовлетворяющим равенству (1).

Если же падающий свет не является монохроматическим, то решетка разложит его в спектр, состоящий из отдельных окрашенных линий. В направлении зеркального отражения ($\varphi = \varphi_0$) возникает максимум нулевого порядка ($k = 0$) для всех длин волн. Слева и справа от него возникнут дифракционные спектры различных порядков ($k = 1, 2 \dots$). В каждом из этих спектров максимумы более коротких длин волн располагаются ближе к нулевому.

На этом основано использование дифракционной решетки, как спектрального прибора.

Качество спектра зависит от угловой дисперсии и разрешающей способности прибора. Легко заметить также, что при освещении решетки светом с известной длиной волны по формуле (1) можно, измерив углы φ и φ_0 , найти постоянную решетки. Зная постоянную d , можно определить неизвестную длину волны светового излучения.

Задание 1

Определить расстояние между дорожками лазерного диска и числа дорожек оптическим способом.

Принципиальная схема хода лучей, отраженных от диска выглядит так:

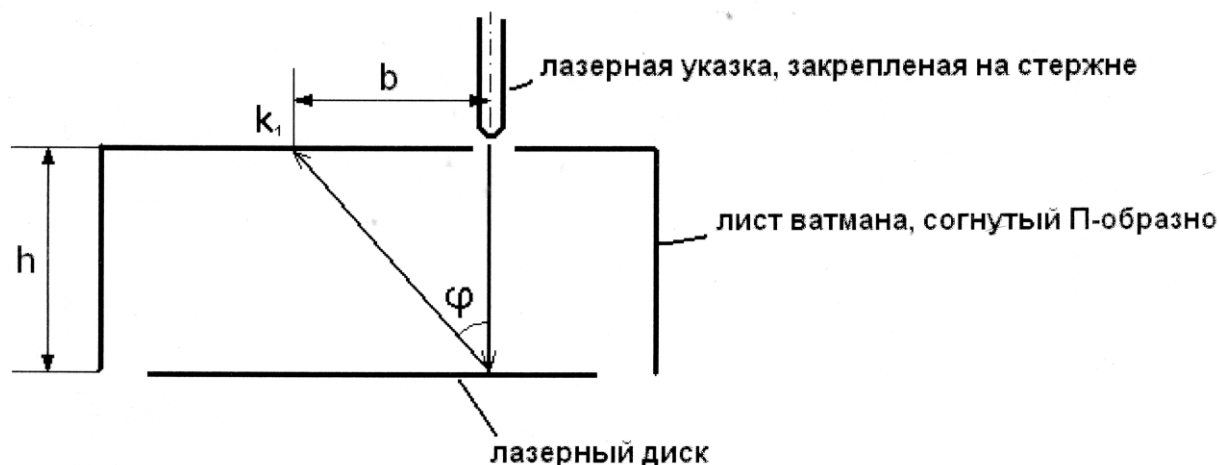


Рис. 2. Схема эксперимента

Порядок выполнения

Согнуть лист ватмана, сделав отверстие для луча лазерной указки, как показано на рисунке, накрыть диск. Включив указку, постарайтесь направить луч на диск под углом $\varphi_0 = 0$, т.е. нормально, при этом отраженный луч будет

освещать указку, а дифрагируемый отразится на угол φ и осветит лист бумаги в точке A для $k = 1$. Карандашом отметить эту точку, если луч осветит боковую поверхность бумаги, уменьшите h - высоту согнутого листа. Затем определите угол φ из соотношения: $\operatorname{tg} \varphi = b/h$ (см. рис 1). Поэтому необходимо измерить миллиметровой линейкой b и h . Далее проведите расчеты по формуле (1) учитывая, что $\varphi_0 = 0$, т.е. $d \cdot \sin \varphi = k \cdot \lambda$, или $d = \frac{\lambda}{\sin \varphi}$ так как $k = 1$.

Полученное значение d выразите в микрометрах.

Определите число дорожек, нанесенных на 1 миллиметр диска. Эта величина рассчитывается по формуле $n = \frac{1}{d}$ (штрихов/мм). Оцените погрешности измерений и сделайте выводы.

Задание 2

Определение расстояния между дорожками DVD диска и числа дорожек по результатам зондовой микроскопии.

С помощью сканирующего зондового микроскопа NanoEducator можно провести исследование поверхности диска методом атомно-силовой микроскопии. Результаты сканирования анализируются и обрабатываются с помощью программы Scan Viewer.

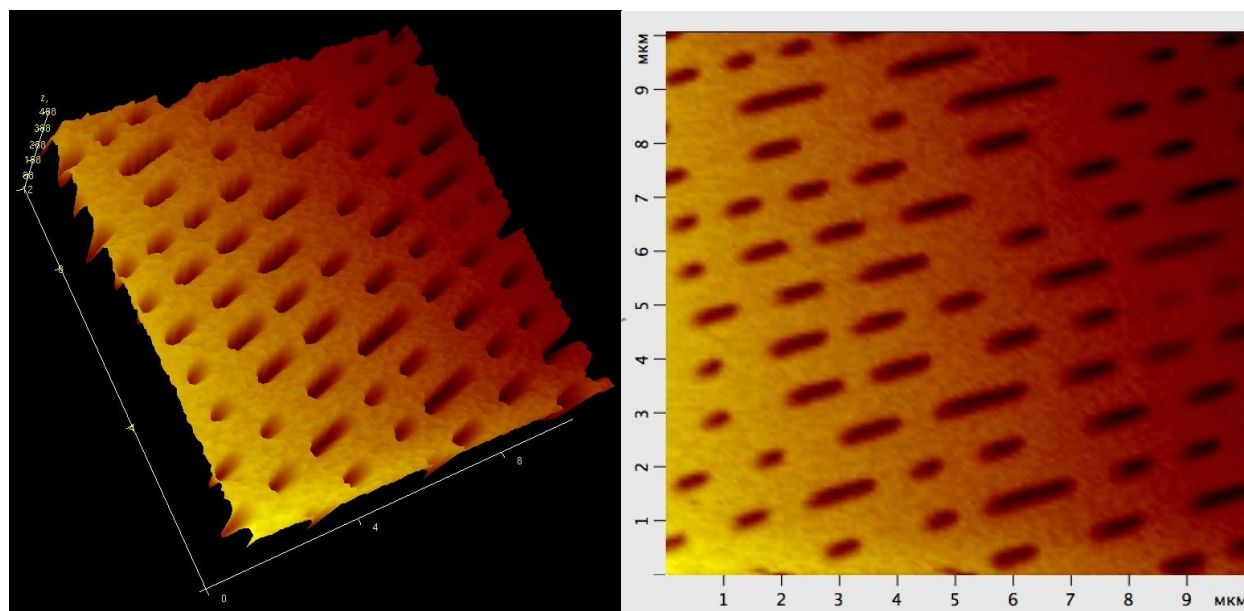


Рис. 3. 3D и 2D изображение DVD диска

На рисунках 3 и 4 представлены 3D, 2D изображения диска, полученные в результате сканирования и обработки данных.

После проведения обработки изображения путем вычитания поверхности и произведения сечения в указанном на рисунке направлении были получены следующие результаты.

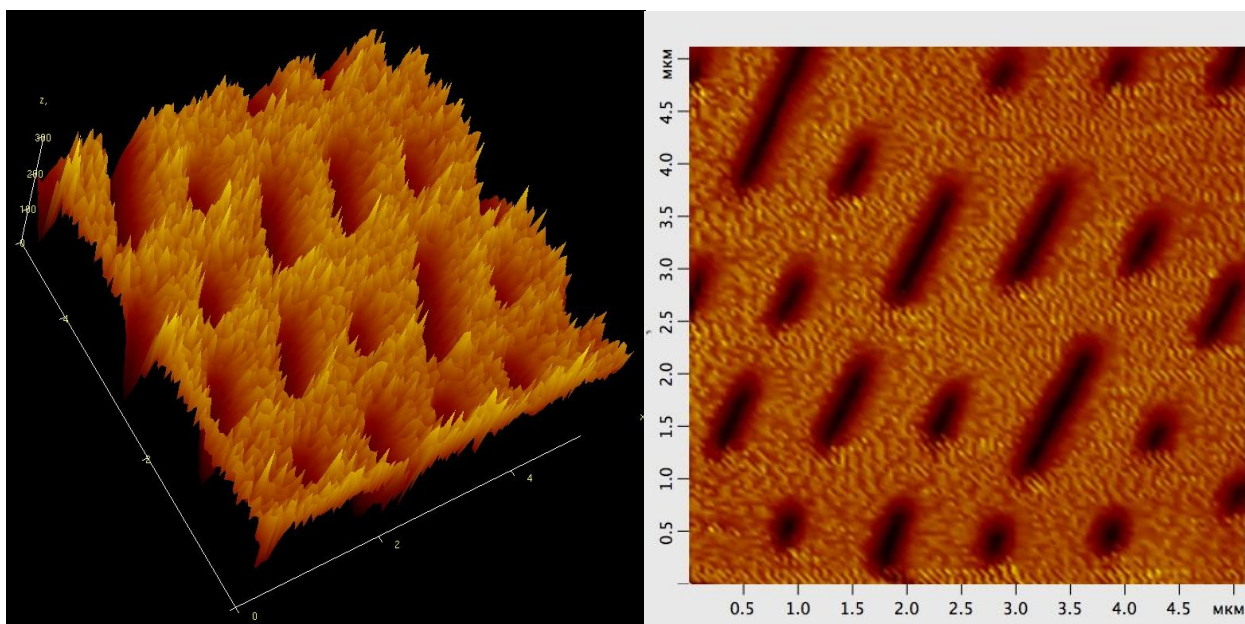


Рис. 4. 3D и 2D изображение DVD диска (с большим разрешением)

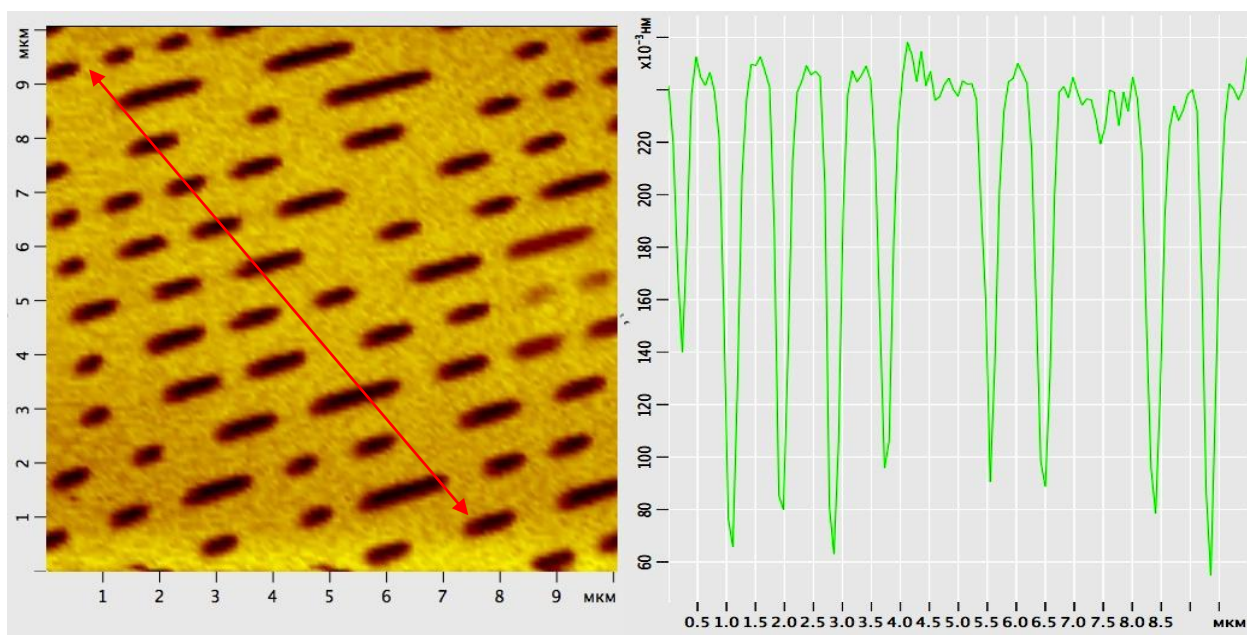


Рис. 5. 2D изображение диска и сечение поверхности
в направлении перпендикулярно дорожкам

Используя рисунок, определите среднее расстояние между дорожками диска и оцените погрешность.

Для этого обычной линейкой проведите 8 измерений расстояний d_i между нижними пиками. Данные занесите в таблицу и рассчитайте методом Стюдента среднее значение величины d_{cp} и ее абсолютную погрешность Δd .

Принять коэффициент Стюдента $t_{p,n} = 2,4$; для $P = 0,95$; $n = 8$.

№ п/п	d_i , мм	d_{cp} , мм	Δd_i , мм	Δd_i^2 , мм ²	S_d , мм	Δd , мм	E_d , %
1							
2							
...							
8							

Результат представьте в виде $d = d_{cp} \pm \Delta d$, мм

Для того, чтобы определить действительное расстояние между питами (пит – это «канавка» на теле диска), необходимо перевести наши миллиметры (мм) на рисунке в микрометры (мкм) в действительности. Для этого используя обычную линейку и масштабную линейку на рисунке, вычислите сколько микрометров содержится в 1 миллиметре. Тогда цена деления ЦД будет равна отношению расстояния, выраженного в микрометрах к расстоянию, выраженному в миллиметрах:

$$\text{ЦД} = \frac{l(\text{мкм})}{l(\text{мм})}$$

Используя получившееся значение цены деления проведите пересчет результата измерения расстояния между дорожками на диске в микрометры, умножив цену деления ЦД на значение расстояния d_{cp} и его погрешности Δd .

Результат представьте в виде

$$d = d_{cp} \pm \Delta d, \text{ мкм}$$

Данное расстояние можно интерпретировать как постоянную дифракционной решетки.

Определите число дорожек, нанесенных на 1 миллиметр диска. Эта величина рассчитывается по формуле $n = \frac{1}{d}$ (штрихов/мм).

Сравните полученные значения расстояния между дорожками диска и числа дорожек, определенных по результатам сканирования поверхности диска с результатом, полученным в задании 1 (модели дифракционной решетки). Проанализируйте результат и сделайте выводы.

Задание 3

Определите длину, ширину и глубину пита.

Используя 2D изображение диска, определите длину пита и оцените погрешность.

Для этого обычной линейкой проведите измерение длин 10 произвольно выбранных питов l_i . Данные занесите в таблицу и рассчитайте методом Стьюдента среднее значение величины l_{cp} и ее абсолютную погрешность Δl .

Принять коэффициент Стьюдента $t_{p,n} = 2,3$; для $P = 0,95$; $n = 10$.

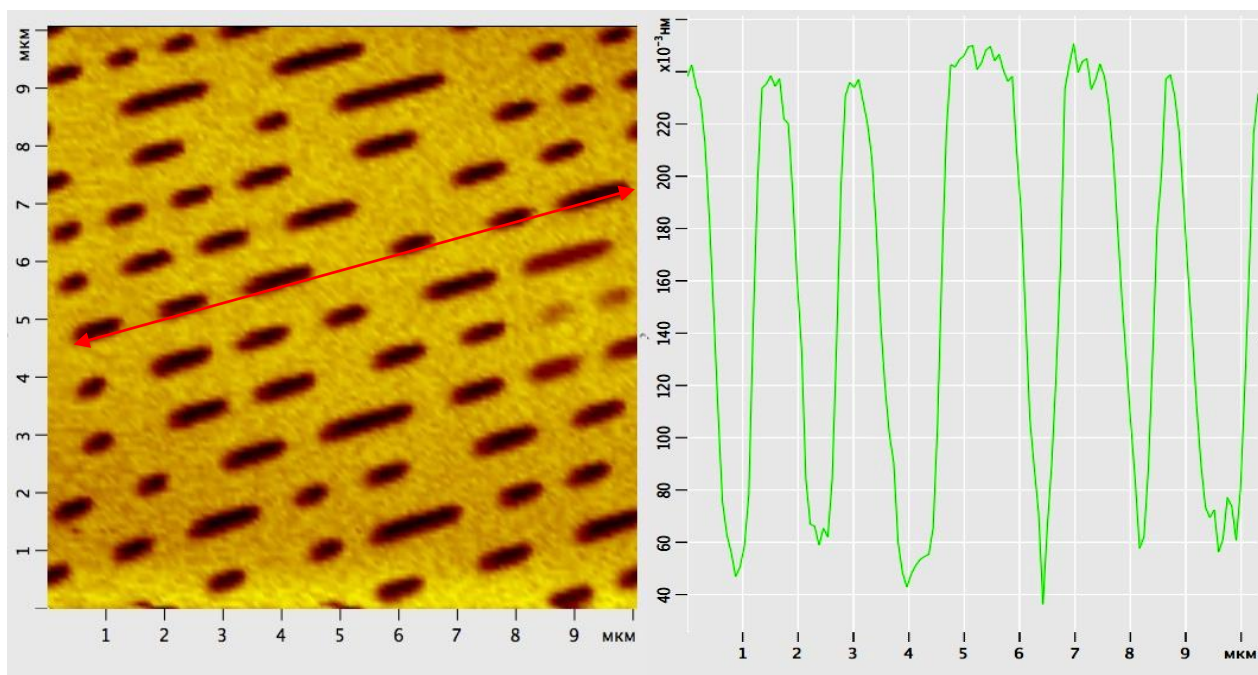


Рис. 6. 2D изображение диска и сечение поверхности в направлении вдоль дорожки

№ п/п	l_i , мм	l_{cp} , мм	Δl_i , мм	Δl_i^2 , мм ²	S_l , мм	Δl , мм	$E_l, \%$
1							
2							
...							
10							

Результат представьте в виде $l = l_{cp} \pm \Delta l$, мм

Для того, чтобы определить действительную длину пита, переведите миллиметры (мм) на микрометры (мкм) в действительности.

Результат представьте в виде $d = d_{cp} \pm \Delta d$, мкм

Определите ширину пита и оцените погрешность.

Для этого обычной линейкой проведите измерение ширины 10 питов b_i . Данные занесите в таблицу и рассчитайте методом Стьюдента среднее значение величины b_{cp} и ее абсолютную погрешность Δb .

Принять коэффициент Стьюдента $t_{p,n} = 2,3$; для $P = 0,95$; $n = 10$.

№ п/п	b_i , мм	b_{cp} , мм	Δb_i , мм	b_i^2 , мм ²	S_b , мм	Δb , мм	$E_b, \%$
1							
2							
...							
10							

Результат представьте в виде $b = b_{cp} \pm \Delta b$, мм

Для того, чтобы определить действительную ширину пита, переведите миллиметры (мм) на в микрометры (мкм) в действительности.

Результат представьте в виде $b = b_{cp} \pm \Delta b$, мкм

Определите глубину пита и оцените погрешность.

Для этого обычной линейкой проведите измерение глубины 5 питов h_i используя рисунок сечения диска в направлении вдоль дорожки. Данные занесите в таблицу и рассчитайте методом Стьюдента среднее значение величины h_{cp} и ее абсолютную погрешность Δh .

Принять коэффициент Стьюдента $t_{p,n} = 2,8$; для $P = 0,95$; $n = 5$.

№ п/п	h_i , мм	h_{cp} , мм	Δh_i , мм	h_i^2 , мм ²	S_h , мм	Δh , мм	E_h , %
1							
2							
...							
50							

Результат представьте в виде $h = h_{cp} \pm \Delta h$, мм

Для того, чтобы определить действительную ширину пита, переведите миллиметры (мм) на в микрометры (мкм) в действительности.

Результат представьте в виде $h = h_{cp} \pm \Delta h$, мкм

Контрольные вопросы

1. Какое явление называют дифракцией света?
2. Почему дифракция звука повседневно более очевидна, чем дифракция света?
3. Каковы дополнения Френеля к принципу Гюйгенса?
4. Дифракция, принцип Гюйгенса-Френеля.
5. Дифракционная решетка, ее основные характеристики (постоянная решетки, дисперсия, разрешающая сила).
6. Почему дифракционная решётка разлагает белый свет в спектр?
7. Поясните порядок следования цветов при дифракции.
8. Как изменится дифракционная картина, если увеличить общее число штрихов решётки, не меняя постоянную решётки?
9. Запишите условия дифракционных минимумов для одной щели и главных максимумов для решётки. Каков характер этих дифракционных картин?
10. Применение дифракции.

ИЗМЕРЕНИЕ РАБОТЫ РАСШИРЕНИЯ ГАЗА ПРИ ИЗОБАРНОМ ПРОЦЕССЕ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ И ПРОВЕРКА ПЕРВОГО НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ

Цель работы: определить работу расширения газа при изобарном процессе, газовую постоянную R , выполнить проверку первого начала термодинамики.

Приборы и принадлежности: сосуд (стеклянный пузырек с крышкой), термометр, тонкая эластичная трубка (трубка от капельницы), сосуд с водой (кастрюлька), нагреватель (кухонная плита), линейка, шприц, маркер.

Общие сведения и методические указания

1. Определение работы расширения газа при изобарном процессе.

Расширяясь, газ совершает работу по перемещению поршня dA , равную $p dV$. Во время изобарного процесса работа газа, при увеличении объема от V_1 до V_2 , равна:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1) \quad (1)$$

В данной работе нужно экспериментально определить работу A расширения воздуха при изобарном нагревании:

$$A = p \Delta V, \quad (2)$$

где p – атмосферное давление; $\Delta V = S \Delta h$ – приращение объема газа; S – площадь сечения манометрической трубки, Δh – смещение столбика подкрашенной жидкости в трубке, соответствующее изменению температуры ΔT при нагревании воздуха в пузырьке.

2. Определение газовой постоянной R .

Запишем уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (3)$$

где R – газовая постоянная; V – объем газа; m – масса газа; M – молярная масса газа; T – термодинамическая температура газа.

Постоянная R одинакова для всех газов. Выразим ее из (3):

$$R = \frac{pV}{\frac{m}{M} T}, \quad (4)$$

где V – объем воздуха в пузырьке вместе с подводными трубками при комнатной температуре.

Объем воздуха в пузырьке можно определить с помощью шприца с водой.

Учитывая, что масса газа может быть найдена как произведение плотности воздуха ρ на объем V , окончательно получим:

$$m = \rho V, \quad (5)$$

где $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Площадь внутреннего сечения S трубки можно определить, набрав в трубку 1 мл воды и измерив длину l столбика жидкости. Тогда искомая площадь будет равна:

$$S = \frac{V}{l}. \quad (6)$$

Так как нагрев воздуха происходит при постоянном давлении, то, продифференцировав уравнение Менделеева-Клапейрона по объему, получим:

$$pdV = \frac{m}{M} R dT, \quad \text{откуда} \quad R = \frac{pdV}{\frac{m}{M} dT} \quad (7)$$

Газовая постоянная R численно равна работе одного моля газа при изобарном нагревании его на один градус. Следовательно, зная работу расширения газа можно найти постоянную R из соотношения (7). Однако в нашей работе, чтобы исключить ошибки при измерениях ΔT и ΔV рекомендуется определить газовую постоянную при исследовании зависимости изменения объема газа от температуры $V = f(T)$, которая представляет собой уравнение Менделеева-Клапейрона, записанное в виде:

$$V = \frac{mR}{Mp} T \quad (8)$$

Величина, равная $\frac{mR}{Mp}$, является постоянной в данной лабораторной работе. Введем обозначение:

$$b = \frac{mR}{Mp}, \quad (9)$$

где m – масса газа, найденная ранее, p – атмосферное давление.

Выразим из (9) газовую постоянную R :

$$R = \frac{bMp}{m}, \quad (10)$$

Учитывая (9), выражение (8) можно представить в виде:

$$V = bT \quad (11)$$

Выражение (11) представляет собой уравнение прямой, для которой b – угловой коэффициент.

Таким образом, построив по экспериментальным данным график зависимости объема V от температуры T можно определить значение углового коэффициента b , равного тангенсу угла наклона, а затем, используя выражение (10) рассчитать значение газовой постоянной R .

3. Проверка первого начала термодинамики.

Согласно первому началу термодинамики, при изобарном нагревании газ поглощает некоторое количество тепла ΔQ , равное

$$\Delta Q = \Delta U + A \quad (12)$$

где ΔU - изменение внутренней энергии газа, равное

$$\Delta U = \frac{i \cdot m}{2 \cdot M} \cdot R \cdot \Delta T, \quad (13)$$

где i – число степеней свободы молекулы газа, ΔT – изменение температуры газа, $A = p\Delta V$ – работа расширения газа.

При постоянном давлении:

$$\Delta U = \frac{i + 2}{2} \frac{m}{M} \cdot R \cdot \Delta T \quad (14)$$

В данной работе по результатам измерений можно рассчитать величины работы A , изменения внутренней энергии ΔU , количества теплоты ΔQ и, подставив в выражения (11), сравнить левую и правую части.

Замечание: для вычисления ΔQ можно воспользоваться процентным соотношением между работой и количеством теплоты при изобарном процессе:

$$\Delta Q = \frac{A \cdot 100\%}{28,5\%}, \quad (15)$$

Выражение (15) легко получить, применив первое начало термодинамики к изобарному процессу для двухатомного газа.

Сравните полученное значение количеством теплоты ΔQ с расчетным по формуле (14).

Описание установки:

На рисунке 1 показаны внешний вид установки (слева) и принципиальная схема (справа).

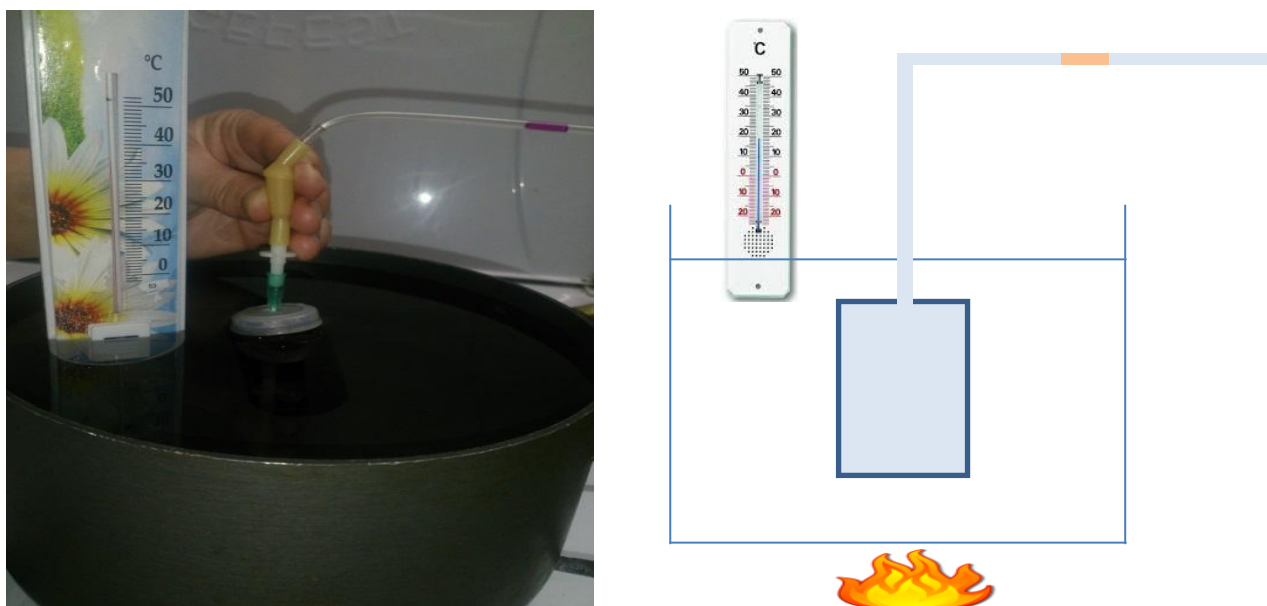


Рис. 1. Схема эксперимента

Работу расширения в данной установке совершает воздух, заключенный в пузырьке, который соединен с тонкой эластичной трубкой. Для этого пузырек с плотно пригнанной крышкой объемом порядка 40 мл соединяют с помощью иглы с трубкой от капельницы. В эту трубку с помощью шприца загоняют небольшой столбик воды, для удобства подкрашенный краской, например марганцовкой. Пузырек помещают в кастрюлю с водой. При нагревании воды воздух в пузырьке расширяется. Столбик жидкости в трубке перемещается. При этом совершается работа против внешнего давления. Можно считать, что во время опыта давление остается почти постоянным и использовать для расчета величину атмосферного давления. Объем пузырька значительно больше объема трубки капельницы. Поэтому можно считать, что практически весь воздух находится при температуре воды в кастрюле.

Воду в кастрюле нагревают на конфорке кухонной плиты. Термометром измеряют температуру воды в кастрюле.

Порядок выполнения работы:

1. Перед началом опыта соберите установку, запишите начальную температуру газа T_0 . Важно расположить трубку со столбиком жидкости внутри горизонтально.
2. Зафиксируйте с помощью маркера начальное положение столбика жидкости в трубке.
3. Медленно нагревая воду в кастрюле, отметьте маркером следующее по-

ложение столбика жидкости в трубке при увеличении температуры на 1°C . Изменение положения столбика жидкости Δh_i измерьте миллиметровой линейкой и запишите в таблицу 1.

4. Повторите измерения согласно пункту 3 еще несколько раз через равные интервалы температур.

Примечание: величина интервала температуры не строго определена, а может варьироваться в зависимости от условий проведения опыта и имеющегося оборудования. Например, можно делать отметки положения столбика жидкости в трубке через каждые $0,5^{\circ}\text{C}$, 2°C и т.д.

Таблица 1.

№	$\Delta T_i, K$	$\Delta h_i, m$	$\Delta V_i, m^3$
1			
2			
3			
...			

Обработка результатов измерений:

1. Вычислите массу газа по формуле (5).
2. Постройте график зависимости объема V от температуры T . Для этого на оси абсцисс откладывайте интервал температур ΔT_i , а на оси ординат – интервал изменения объема ΔV_i . По графику определите угловой коэффициент b полученной прямой, учитывая весь интервал изменения температуры ΔT и объема ΔV .
3. По формуле (10) рассчитайте значение газовой постоянной R . Сравните получившееся значение с табличным.
4. По формуле (2) рассчитайте значение работы A . За понижение уровня положения мениска в левом колене манометрической трубки примите разность Δh , соответствующую изменению температуры ΔT за все время эксперимента.
5. Вычислите сообщенное воздуху количество теплоты ΔQ соответствующее изменению температуры ΔT за все время эксперимента, используя выражение (14).
6. Вычислите изменение внутренней энергии ΔU , соответствующее изменению температуры ΔT за все время эксперимента, используя выражение (13).
7. Проверьте выполнение равенства (12). Сделайте вывод.

Необходимые постоянные:

$$\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}; \quad R = 8,32 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}; \quad p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Контрольные вопросы.

1. Сформулируйте первое начало термодинамики и примените его к различным процессам в идеальном газе.
2. Что означает внутренняя энергия идеального газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории?
3. Запишите уравнение Менделеева-Клапейрона
4. Запишите в дифференциальной форме первое начало термодинамики для адиабатического процесса.
5. Дайте определение молярной и удельной теплоёмкостей. Покажите связь между ними.
6. Выведите уравнение Пуассона.
7. Выведите уравнение Майера и объясните физический смысл универсальной газовой постоянной.
8. Что означает степень свободы молекулы?
9. Получите связь со степенями свободы теплоёмкостей C_p и C_v .
10. Объясните принцип работы установки. Получите расчётные формулы.
11. Каковы источники ошибок в данной работе?