

## ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕХАНИКИ»

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

#### «ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА»

**Цель работы:** исследование свойств физического маятника и экспериментальное определение ускорения свободного падения.

##### Теоретические основы работы

Наиболее точные измерения ускорения свободного падения выполняются с помощью косвенных методов. Многие из них основаны на использовании формул для периода колебаний математического и физического маятников.

Математическим маятником называется материальная точка, подвешенная на невесомой, нерастяжимой нити и совершающая колебание в вертикальной плоскости под действием силы тяжести. Достаточно хорошим приближением к математическому маятнику служит небольшой тяжелый шарик, подвешенный на длинной тонкой нити.

Физическим маятником называется абсолютно твердое тело, совершающее колебания под действием силы тяжести вокруг горизонтальной оси, не проходящей через его центр тяжести.

При малых углах отклонения от положения равновесия физический маятник совершает гармонические колебания с периодом:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{J_0}{m \cdot g \cdot a}} = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{J_c + ma^2}{m \cdot g \cdot a}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{J_c + m \cdot a^2 / m \cdot a}{g}} \quad (1)$$

где  $J_0$  – момент инерции маятника относительно оси подвеса,  $J_c$  – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через центр масс,  $a$  – расстояние от точки подвеса до центра масс маятника,  $m$  – масса.

Для математического маятника, масса которого сосредоточена в центре инерции, имеем  $J_M = ml^2$ ;

$$T_M = 2\pi\sqrt{l/g} \quad (2)$$

Сравнивая (1) и (2) получаем величину  $\frac{J_c + m \cdot a^2}{m \cdot a} = \frac{J_0}{m \cdot a} = l$

$l$  называют **приведенной длиной физического маятника**, это расстояние от центра тяжести до оси качаний.

Зная  $T$ ,  $m$ ,  $l$  и  $J$  можно по формуле (2) найти ускорение свободного падения  $g$ . Массу маятника и период его колебаний можно измерить с очень высокой точностью, но момент инерции и расстояние от точки подвеса маятника до его центра масс с трудом поддаются непосредственному измерению. Чтобы обойти эту трудность, применяют метод обратного маятника, который позволяет исключить момент инерции из расчетной формулы для  $g$ .

**Метод обратного маятника** основан на том, что во всяком физическом маятнике можно найти такие две точки, что при последовательном подвешивании маятника за одну или другую, период колебаний его остается одним и тем же (свойство сопряженности центра качания и точки подвеса). Расстояние между этими точками представляет собой приведенную длину данного маятника.

Обратный маятник имеет две призмы, острые ребра которых обращены друг к другу, а прямая, их соединяющая, есть ось симметрии и, следовательно, содержит центр масс. Маятник заставляют поочередно качаться на этих ребрах, а перемещением дополнительных грузов достигают того, чтобы периоды малых колебаний маятника

совпали. Расстояние между ребрами можно очень точно измерить, и оно будет равно длине эквивалентного математического маятника.

На рисунке 1:

- В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub> опорные призмы, закрепленные неподвижно на металлическом стержне; каждая из опорных призм может быть точкой подвеса.
- грузы в виде чечевиц расположены на стержне: подвижный Д и неподвижный А.
- Из уравнения (1) для сопряженных точек получаем следующее соотношение:

$$\text{Следовательно } \frac{J_c + m \cdot a_1^2}{a_1} = \frac{J_c + m \cdot a_2^2}{a_2}$$

$$\frac{J_c}{m} \cdot \left( \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} \right) = a_2 - a_1,$$

$$\text{откуда } \frac{J_c}{m} = a_1 \cdot a_2.$$

Подставляя  $\frac{J_c}{m}$  в (1) получим  $l = a_1 + a_2$  и  $T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{a_1 + a_2}{g}}$  (3) рис 1.

Эту формулу можно использовать для определения ускорения свободного падения

$$g = 4 \cdot \pi^2 \cdot \frac{a_1 + a_2}{T^2} \quad \text{или}$$

$$(4) \quad \boxed{g = 4 \cdot \pi^2 \cdot \frac{l}{T^2}}$$

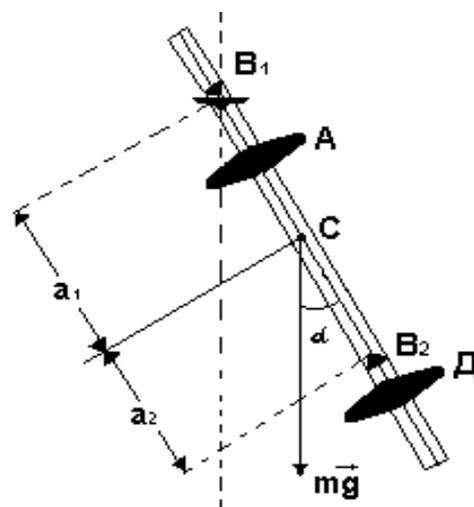
где  $l$  – приведенная длина физического маятника (равна расстоянию между сопряженными точками, в случае оборотного маятника - расстоянию между призмами при  $T_1 = T_2$ ).

В современной физике выделился раздел – физика колебаний, в котором рассматриваются с единой точки зрения колебания различной природы (колебания маятников, струн, частей машин и механизмов, давление воздуха при распространении в нем звука, качка корабля, волнение моря, колебания переменного тока в цепи, колебание мембраны телефона).

**Записать в тетрадь и знать определения:**

- колебания;
- гармонического колебания;
- свободного колебания;
- амплитуды колебаний, периода, частоты, фазы колебаний;
- математического и физического маятников.

### Описание рабочей установки



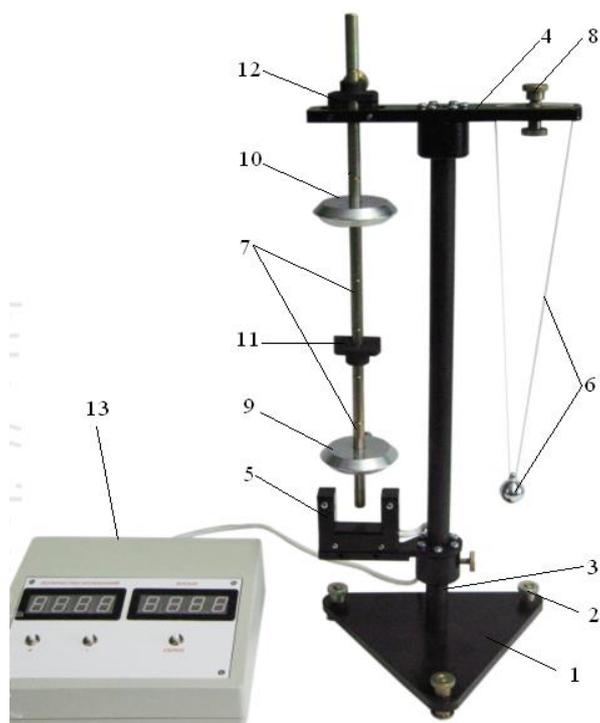


Рис 2.

Общий вид универсального маятника FPM-04 представлен на рис 2. Основание 1 оснащено регулируемыми ножками 2, которые позволяют произвести выравнивание прибора. В основании закреплена колонка 3, на которой зафиксирован кронштейн с фотоэлектрическим датчиком 5.

После отвинчивания воротка верхний кронштейн 4 можно поворачивать вокруг колонки. С одной стороны кронштейна находится математический маятник 6, с другой на смонтированных вкладышах подвешивают физический маятник 7.

Длину математического маятника можно регулировать при помощи воротка 8, а ее величину можно определять с помощью шкалы на колонке 3.

Оборотный маятник выполнен в виде стального стержня, на котором закреплены два груза 9 и 10 и опорные призмы 11, 12, повернутые друг к другу лезвиями. На стальном стержне через 10 мм выполнены кольцевые углубления, служащие для точного определения длины оборотного маятника  $l$  (расстояние между призмами).

Нижний кронштейн вместе с фотоэлектрическим датчиком 5 можно перемещать вдоль колонки и фиксировать в произвольно выбранном положении.

Фотоэлектрический датчик соединен с универсальным миллисекундомером FPM-14. На лицевой панели универсального миллисекундомера 13 находятся два окошка (счет количества колебаний и секундомер) и следующие кнопки:

СБРОС – установка нуля измерителя;

ПУСК – запуск измерений;

СТОП – окончание измерения;

На задней панели – выключатель сети.

### Порядок выполнения работы

1. Поверните верхний кронштейн таким образом, чтобы подвес физического маятника был в рабочем положении (над фотоэлектрическим датчиком).
2. Установите физический маятник на первой призме; убедитесь, что конец стержня маятника перекрывает световой луч, поступающий от лампочки на фотодатчик.
3. Нажмите кнопку СБРОС.
4. Отклоните маятник на угол  $4-6^\circ$  от положения равновесия, после начала колебаний нажмите кнопку ПУСК.

5. После подсчета измерителем 20-30 полных колебаний нажмите кнопку СТОП.
6. Определите период колебаний физического маятника  $T_1$ , для этого время разделите на число колебаний  $T = \frac{t}{n}$ .
7. Снимите маятник и, перевернув его, подвесьте на второй призме.
8. Нижний кронштейн с фотоэлектрическим датчиком 5 переместите так, чтобы конец стержня маятника перекрывал световой луч, поступающий от лампочки на фотодатчик.
9. Повторите опыт согласно пунктам 3-5.
10. Определите период колебаний физического маятника  $T_2$
11. Сравните результаты расчетов. (Для оборотного маятника расхождения в значениях  $T_1$  и  $T_2$  не должны превышать 1%).
12. Проведите измерения периода  $T_1$  и  $T_2$  при различных положениях груза (чечевицы) Д, подвешивая маятник в точках В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub>.
13. Данные измерений и вычислений занесите в таблицу:

№	на опоре В <sub>1</sub>				на опоре В <sub>2</sub>		
	n <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>		n <sub>2</sub>	t <sub>2</sub>	T <sub>2</sub>
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							

**Помните:** сближение грузов ведет к уменьшению, а удлинение расстояния между грузами - к увеличению периода качания.

14. Получив результат с расхождением не более  $10^{-2}$  с, определите приведенную длину оборотного маятника  $l$ , подсчитывая количество насечек на стержне между ножами призм (они нанесены через каждые 10 мм).
15. Определите ускорение свободного падения  $g$  по формуле (4), приняв  $T=T_{cp}$  выбранной пары  $T_1$  и  $T_2$ .
16. Сравните результат  $g$  с табличным для широты города Армавира ( $g_0=9,80665$  м/с<sup>2</sup>).
17. Оцените относительную и абсолютную погрешности результатов измерения по формулам:

✓ абсолютная погрешность результата:  $\Delta g = |g - g_0|,$

✓ относительная погрешность результата:  $\varepsilon = \frac{\Delta g}{g_0} \cdot 100\% ,$

18. Вывод оформить по образцу.

Форма написания вывода :

**(наименование параметра полностью, числовые данные - с размерностью)**

При экспериментальном определении методом оборотного маятника получено значение ускорения свободного падения, равное ..... с точностью до .....

которое совпадает (не совпадает) с табличным значением данной величины для широты города Армавира, равным ..... ..

### Контрольные вопросы

1. Что называется физическим маятником?
2. Что называется периодом колебания?
3. Что называется амплитудой колебаний?
4. Что называется фазой колебаний?
5. Какое колебание называется гармоническим?
6. Чему равен период колебаний физического маятника?
7. Что такое оборотный маятник?
8. Каков физический смысл приведенной длины физического маятника?
9. Дать вывод формулы (4).
10. Доказать, что приведенная длина оборотного маятника, у которого в обоих положениях совпадают периоды, равна расстоянию между точками подвеса:  $l = a_1 + a_2$ .
11. Как связаны ускорение и координата при гармонических колебаниях?
12. Как связана циклическая частота колебаний с периодом?
13. Почему частота колебаний пружинного маятника зависит от массы, а частота колебаний математического маятника от частоты не зависит?

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

#### «ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА»

**Цель работы:** экспериментальное определение ускорения свободного падения.

#### Теоретические основы работы

Величина ускорения свободного падения под действием силы тяжести изменяется в зависимости от географической широты места и высоты над уровнем моря. Ускорение свободного падения на уровне моря для географической широты  $45^\circ$  принято считать нормальным, оно равно

$$g_0 = 9,80665 \text{ м/с}^2.$$

Направление ускорения свободного падения можно определять направлением нити отвеса. Определить ускорение свободного падения для данной географической широты можно с помощью математического маятника.

Математическим маятником обычно называют тело малых размеров (материальную точку), подвешенное к неподвижной точке на невесомой нерастяжимой нити и совершающее движение в вертикальной плоскости под действием силы тяжести. Таким маятником можно считать тяжелый шар массой  $m$ , подвешенный на тонкой нити, длина  $l$  которой намного больше размеров шара (рис 1).

в полярных координатах уравнение движения такой системы имеет вид:

$$ml^2 \varphi'' = -mgl \sin \varphi, \text{ или } \varphi'' + \omega_0^2 \sin \varphi = 0, \text{ где } \omega_0^2 = g/l.$$

Для малых углов отклонения маятника, при которых  $\sin \varphi \approx \varphi$ , оно сводится к уравнению гармонических колебаний

$$\varphi'' + \omega_0^2 \varphi = 0$$



Рис 1.

Решение данного уравнения может быть записано в виде

$$\varphi(t) = A \cos(\omega_0 t + \delta)$$

где  $A$  – амплитуда,  $\delta$  – начальная фаза колебания. Таким образом, при малых амплитудах математический маятник совершает гармонические колебания с частотой  $\omega_0 = \sqrt{g/l}$

и периодом  $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ ,

где  $T$  – период колебаний,

$l$  – длина подвеса,

$g$  – ускорение силы тяжести.

В данной работе предлагается определить ускорение свободного падения, используя математический маятник, у которого можно изменять длину.

Непосредственное измерение длины маятника представляет собой довольно сложную задачу, т.к. приходится определять положение центра тяжести шарика и точки подвеса. Поэтому определяют не длину маятника  $l$ , а разность длин  $l_1 - l_2$ .

Делают это таким образом: берут маятник произвольной (например, наибольшей длины) и определяют период колебаний:

$$T_1 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l_1}{g}} \quad (1)$$

Затем маятник укорачивают на некоторую величину и вновь определяют период колебаний:

$$T_2 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l_2}{g}} \quad (2)$$

Вычтя из квадрата равенства (1) квадрат равенства (2), решают полученное уравнение относительно  $g$  и находят, что

$$g = 4 \cdot \pi^2 \cdot \frac{l_1 - l_2}{T_1^2 - T_2^2} \quad (3)$$

Длину маятника можно изменять при помощи ролика подвеса.

#### Описание установки

Схема установки показана на рис 2.

В качестве математического маятника используется металлический шар 1, подвешенный на двух капроновых нитях к кронштейну 2. На этом же кронштейне находится также ролик 3, позволяющий изменять длину подвеса.

На нижнем кронштейне укреплен фотоэлектрический датчик 4. Расстояние между кронштейнами определяется по нанесенной на штатив шкале 5.

Фотоэлектрический датчик соединен с универсальным миллисекундомером ФРМ-14. На лицевой панели универсального миллисекундомера 13 находятся два окошка (счет количества колебаний и секундомер) и следующие кнопки:

СБРОС – установка нуля измерителя;

ПУСК – запуск измерений

СТОП – окончание измерения.

На задней панели – выключатель сети;

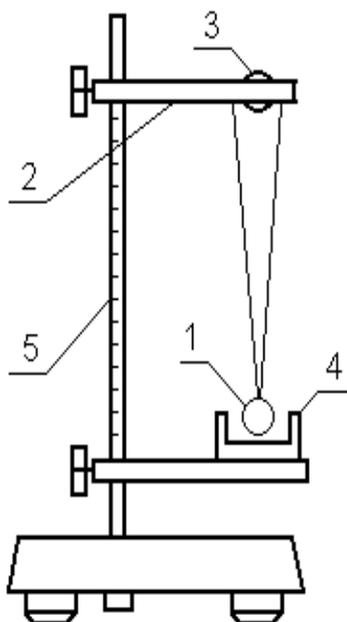


Рис 2.

### Порядок выполнения работы

1. Установить нижний кронштейн с фотодатчиком 4 в крайнее нижнее положение шкалы 5 так, чтобы верхняя плоскость кронштейна совпала с одной из рисок шкалы.
2. Установить верхний кронштейн таким образом, чтобы шарик 1 математического маятника оказался в рабочей зоне фотодатчика.
3. Вращая ролик 3, добиться такого положения шарика, при котором его центральная риска будет совпадать по высоте с риской на фотодатчике.
4. Нажать на кнопку сброс на блоке.
5. Привести математический маятник в колебательное движение, отклонив металлический шарик на угол 5 – 6 градусов, после чего нажать на кнопку пуск на блоке.
6. По показанию универсального миллисекундомера определить значение времени 40 ... 50 колебаний маятника (нажать на кнопку стоп на блоке). Определить среднее значение периода колебаний маятника по формуле  $T_1 = t_1 / N$ , где  $t_1$  – время колебаний,  $n$  – число колебаний. Результаты измерений и вычислений ( $t_1, n_1, T_1$ ) записать в первую строку таблицы.
7. Передвинуть вверх кронштейн с фотодатчиком на 5 см шкалы вертикальной стойки. Это значение  $l_1 - l_2 = 0,05$  м записать в соответствующую графу первой строки таблицы.
8. Вращая ролик 3, добиться такого положения шарика, при котором его центральная риска будет совпадать по высоте с риской на фотодатчике. Повторить эксперимент по п. 4-6. Определить значение времени 40 ... 50 колебаний маятника ( $t_2, n_2, T_2$ ). По данным первой строки вычислить  $g$  по формуле (3):

$$g = 4 \cdot \pi^2 \cdot \frac{l_1 - l_2}{T_1^2 - T_2^2}$$

и результат записать в таблицу.

9. Снова укоротить маятник на 5 см, записав во вторую строку таблицы  $l_1 - l_2$ , которое отсчитывается от положения маятника, соответствующей наибольшей его длине (т.е. от первоначального положения). Определить период колебаний  $T_2$ , измерив время ( $t_2$ ) для 40 ... 50 колебаний ( $n_2$ ) и записать результаты в таблицу. Для значений ( $t_1, n_1, T_1$ ) взять данные из предыдущей строки, т.к. они соответствуют первоначальной длине маятника и произвести расчет ускорения свободного падения  $g$ . Результат записать во вторую строку таблицы.
10. Уменьшить длину маятника еще на 5 см. Измерить время и период 40 ... 50 колебаний самого короткого маятника и результаты вычислений записать в третью строку таблицы. Учсть при этом, что ( $t_1, n_1, T_1$ ) берутся для маятника наибольшей длины, а разность  $l_1 - l_2$  определяется от первоначального положения шарика.
11. Результаты занести в таблицу :

№	N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub> (С)	T <sub>1</sub> (С)	L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub> , М	N <sub>2</sub>	T <sub>2</sub> (С)	T <sub>2</sub> (С)	G (М/С <sup>2</sup> )
1				0,05				
2				0,10				
3				0,15				

12. Вычисленные значения ускорения свободного падения содержит ошибки. В качестве окончательного результата измерений следует взять среднее значение:

$$\langle g \rangle = \frac{1}{3} \cdot (g_1 + g_2 + g_3)$$

13. Полученный результат сравнить с нормальным значением  $g_0$  для широты города Армавира ( $\varphi = 45^\circ$ ,  $g_0 = 9,80665$  м/с<sup>2</sup>).
14. Вычислить абсолютную погрешность

$$\Delta g = \langle g \rangle - g_0,$$

и относительную погрешность

$$\varepsilon = \left| \frac{\Delta g}{\langle g \rangle} \right| \cdot 100\%$$

15. Сделать вывод по проделанной работе.

Форма написания вывода :

**(наименование параметра полностью, числовые данные - с размерностью)**

При экспериментальном определении методом математического маятника получено значение ускорения свободного падения, равное ..... с точностью до ....., которое совпадает (*не совпадает*) с табличным значением данной величины для широты города Армавира, равным .....

#### **Контрольные вопросы**

1. Что называется математическим маятником?
2. Что называется периодом колебаний?
3. Что называется амплитудой колебаний?
4. Дать графическое изображение сил, действующих на математический маятник, когда он выведен из положения равновесия и найти графическим методом равнодействующую этих сил.
5. Какое колебание называется гармоническим?
6. Что называется фазой колебаний ?
7. Что называется пружинным маятником ?
8. Чему равен период колебаний пружинного маятника ?
9. Чему равен период колебаний математического маятника ?
10. Дать вывод формулы (3).

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ СОУДАРЕНИЯ ТЕЛ»

**Цель работы:** определение коэффициентов восстановления, скорости и энергии при центральном ударе двух шаров, времени и средней силы соударения.

### Теоретические основы работы

Ударом называется внезапное изменение движения тела вследствие столкновения его с другим телом. Отличительной особенностью удара является весьма малая длительность соприкосновения ударяющихся тел. Если скорости тел до удара направлены вдоль прямой, соединяющей центры масс этих тел, удар называется центральным.

Отношение относительной скорости после столкновения к относительной скорости их до столкновения носит название коэффициента восстановления.

Предположим, первый шар до столкновения имел скорость  $V_1$ , а после столкновения – скорость  $V_1'$ , второй шар имел аналогичные скорости  $V_2$  и  $V_2'$ . В таком случае коэффициент восстановления  $\varepsilon_v$  выразится формулой:

$$\varepsilon_v = \frac{V'_{\text{отн}}}{V_{\text{отн}}} = \frac{|\vec{V}'_2 - \vec{V}'_1|}{|\vec{V}_2 - \vec{V}_1|} \quad (1)$$

Если  $\varepsilon_v=0$ , то удар именуется абсолютно неупругим. Если  $\varepsilon_v=1$  - удар именуется абсолютно упругим. (В действительности же коэффициент восстановления всегда бывает больше нуля, но меньше единицы  $1 > \varepsilon > 0$ . При ударе свинцовых шаров  $\varepsilon$  близок к нулю. Поэтому их удар приближается к абсолютно неупругому. Для шаров из слоновой кости  $\varepsilon=0,9$ , вследствие чего их удар рассматривается как удар, близкий к абсолютно упругому.) При неупругом ударе часть кинетической энергии превращается во внутреннюю энергию, т.к. при этом совершается работа на деформацию тел. При абсолютно упругом ударе не должно быть никаких потерь кинетической энергии, т.к. в этом случае отсутствует остаточная деформация.

Отведем один из шаров на некоторый угол  $\alpha_1$  и отпустим без начальной скорости. Шар начнет двигаться вниз по дуге, разгоняясь, при этом его потенциальная энергия будет переходить в кинетическую. Пусть столкновение со вторым шаром происходит в тот момент, когда нить первого шара становится вертикально. По закону сохранения механической энергии (см. рис .2)

$$m_1gh = \frac{m_1V_1^2}{2} \quad (2)$$

где  $m_1$  – масса шара,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h$  – высота шара в отведенном положении относительно нижней точки траектории,  $V_1$  – скорость первого шара в нижней точке перед соударением со вторым.

$$\text{Из рисунка видно, что } h = l - l \cos \alpha_1 \quad (3)$$

где  $l$  – расстояние от точки подвеса до центра тяжести шара,  $\alpha_1$  – угол начального отклонения нити.

Из уравнений (2) и (3) найдем выражение для скорости через угол начального отклонения:

$$V_1 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha_1)} = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha_1}{2} \quad (4)$$

После удара шары получают скорости  $V_1'$  и  $V_2'$  (см. рис.3.), и, разлетаясь, отклоняют нити на максимальные углы  $\alpha_1'$  и  $\alpha_2'$ , соответственно.

Аналогично соотношению (4) получаем

$$V_1' = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha_1'}{2} \quad V_2' = 2\sqrt{gl} \sin \frac{\alpha_2'}{2} \quad (5)$$

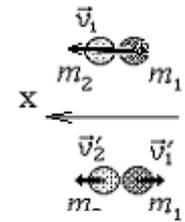


Рис. 3

Если удар происходит достаточно быстро и нити во время удара не успевают отклониться на заметный угол, то в направлении горизонтальной оси x не возникает внешних сил и выполняется закон сохранения импульса в проекции на эту ось:

$$m_1 V_1 = m_2 V_2' - m_1 V_1' \quad (6)$$

Коэффициент  $\varepsilon_v$  восстановления скорости в данном случае [формула (1) с учетом (4), (5)] рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_v = \frac{V_2' + V_1'}{V_1} = \frac{\sin \frac{\alpha_2'}{2} + \sin \frac{\alpha_1'}{2}}{\sin \frac{\alpha_1}{2}} \quad (7)$$

Кроме коэффициента восстановления скорости соударение тел характеризуется коэффициентом  $\varepsilon_w$  восстановления энергии, равным отношению кинетической энергии тел после удара к их кинетической энергии до удара:

$$\varepsilon_w = \frac{\frac{1}{2} m_1 V_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 V_2'^2}{\frac{1}{2} m_1 V_1^2 + \frac{1}{2} m_2 V_2^2} \quad (8)$$

Учитывая, что скорость второго шара до удара  $V_2 = 0$  и подставляя для скоростей выражения (4), (5), находим рабочую формулу для коэффициента восстановления энергии:

$$\varepsilon_w = \frac{m_1 \sin^2 \frac{\alpha_1'}{2} + m_2 \sin^2 \frac{\alpha_2'}{2}}{m_1 \sin^2 \frac{\alpha_1}{2}} \quad (9)$$

Если известна длительность удара  $\tau$ , то из второго закона Ньютона по изменению импульса одного из шаров можно определить среднюю силу взаимодействия между шарами:

$$\vec{F}_{\text{ср}} = \frac{m_2 \vec{V}_2' - m_2 \vec{V}_2}{\tau} \quad \text{или} \quad F_{\text{ср}} = \frac{m_2 V_2'}{\tau} \quad (10)$$

## Описание рабочей установки

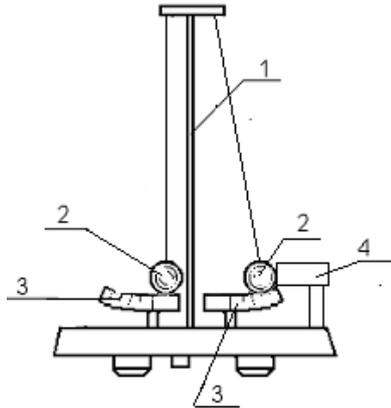


Рис.1

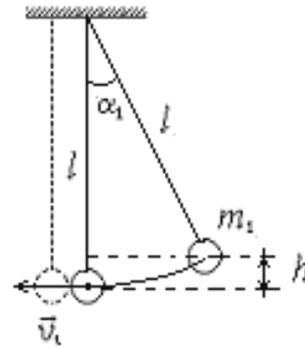


Рис.2

Схема лабораторной установки показана на *рис. 1*. К кронштейну штатива 1 при помощи нитей прикреплены два шара 2. Углы отклонения подвесов от вертикали определяются по шкалам 3. Электромагнит 4 служит для удержания одного из шаров в отклоненном положении.

Для проведения данного исследования в скобы подвесов вставлены шары: в правую скобу алюминиевый шар со стальной вставкой (она должна быть обращена в сторону эл.магнита), а в левую скобу латунный. С помощью регулировочных опор основание установки выставлено таким образом, чтобы нижние визиры скоб подвеса указывали на нули шкал. Положение шаров в вертикальной и горизонтальной плоскостях отрегулировано до совмещения верхних визиров скоб подвеса. (Регулировка производится с помощью изменения длины подвеса шаров, а также изменения положения узлов крепления нитей на верхнем кронштейне).

Электромагнит 4 и клеммы верхнего кронштейна подключены к универсальному миллисекундомеру ФРМ-14, на лицевой панели которого находятся кнопки управления:

СБРОС – установка нуля измерителя;

ПУСК – запуск измерений;

СТОП – окончание измерения;

На задней панели – выключатель сети.

## Порядок выполнения работы

1. Проверьте правильность расположения верхних и нижних скоб подвесов.
2. Проверьте подключение электромагнита 4 и клемм верхнего кронштейна к электронному блоку. Включите блок в сеть.
3. На пульте блока нажмите кнопку “СБРОС”. При этом на табло индикации высветятся нули, на электромагнит будет подано напряжение.
4. Отведите правый шар и зафиксируйте его с помощью электромагнита. Определите начальный угол отклонения правого шара  $\alpha_1$ .
5. Нажмите кнопку “ПУСК”, при этом электромагнит перестанет удерживать правый шар, произойдет удар шаров. По таймеру блока определите время соударения шаров  $t$ .
6. Выполните пп. 4-5 и при помощи шкал визуально определите углы отскока шаров  $\alpha_1'$  и  $\alpha_2'$ . Повторите измерения углов отскока не менее трех раз. Найдите среднее значение каждого из углов  $\alpha_{1cp}'$  и  $\alpha_{2cp}'$
7. Определите расстояние  $l$  от точки подвеса до центра тяжести шара.

8. По формуле (4) определите скорость  $V_1$  первого шара перед ударом. Используя средние значения углов отскока по формулам (5) определите скорости обоих шаров сразу после удара  $V_1'$  и  $V_2'$ . Проверьте выполнение закона сохранения импульса (6).
9. Используя средние значения углов отскока определите коэффициенты восстановления скорости и энергии по формулам (7), (9).
10. Используя найденное выше значение  $V_2'$  по формуле (10) определите среднюю силу, с которой шары действуют друг на друга во время удара.
11. Заполните таблицу.

**Массы шаров:**

1. Алюминиевый со стальной вставкой – 43,1 г
2. Латунный – 120,5 г

**Таблица 1.**

Масса бьющего шара (кг)	Масса покоящегося шара (кг)	Время соударения (с)	Угол отклонения до удара		Скорости до удара		Угол отклонения после удара				Скорости после удара		Коэффициент восстановления скорости $\epsilon_v$	Коэффициент восстановления энергии $\epsilon_w$	Средняя сила $F_{cp}$	
			$\alpha_1$	$\alpha_2$	$V_1$ $\left(\frac{m}{c}\right)$	$V_2$ $\left(\frac{m}{c}\right)$	$\alpha_1'$	$\alpha_{1cp}'$	$\alpha_2'$	$\alpha_{2cp}'$	$V_1'$ $\left(\frac{m}{c}\right)$	$V_2'$ $\left(\frac{m}{c}\right)$				
				0		0	1.			1.						
							2.			2.						
							3.			3.						

12. Сделать вывод по проделанной работе.

Форма написания вывода :

**(наименование параметра полностью, числовые данные - с размерностью)**

При экспериментальном определении коэффициентов восстановления, скорости и энергии при центральном ударе двух шаров, времени и средней силы соударения получены следующие данные:

- ✚ Скорость шара 1 перед ударом.....
- ✚ Скорости шаров 1 и 2 после удара соответственно ....
- ✚ Коэффициент восстановления скорости .....
- ✚ Коэффициент восстановления энергии .....
- ✚ Средняя сила соударения .....

**Контрольные вопросы**

1. Дайте определение и приведите основные динамические характеристики упругого и неупругого удара.
2. Укажите соотношение масс ударяющихся тел для случаев, когда целью удара является перемещение неподвижного тела и когда – деформация тела.
3. Умейте привести вывод формулы (4)
4. Какие законы сохранения выполняются для упругого и неупругого ударов?
5. Что определяет коэффициент восстановления скорости и энергии?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### «ПРОВЕРКА ВТОРОГО ЗАКОНА НЬЮТОНА»

**Цель работы:** экспериментальное определение ускорения свободного падения с помощью машины Атвуда.

#### Теоретические основы работы

Второй закон Ньютона для материальной точки в векторной форме записывается так:

$$m \cdot \vec{a} = \sum \vec{F}_k$$

где  $\sum \vec{F}_k$  - геометрическая сумма всех сил, действующих на точку.

Для данной механической системы тел (одного тела) он имеет вид:

$$M \cdot \vec{a}_c = \sum \vec{F}_k^e$$

где  $M$  - масса всей системы (одного тела),  $\vec{a}_c$  - вектор ускорения центра масс системы (тела),  $\sum \vec{F}_k^e$  - геометрическая сумма всех внешних сил, действующих на систему.

Обычно используется скалярная форма закона, т.е. он расписывается в проекциях на координатные оси:

$$\begin{aligned} m \cdot a_x &= \sum F_{kx} & M \cdot a_{cx} &= \sum F_{kx}^e \\ m \cdot a_y &= \sum F_{ky} & M \cdot a_{cy} &= \sum F_{ky}^e \\ m \cdot a_z &= \sum F_{kz} & M \cdot a_{cz} &= \sum F_{kz}^e \end{aligned}$$

В данной работе, применяя второй закон Ньютона к первому и второму телу, движущимся с одинаковыми по модулю ускорениями, будем иметь:

$$\begin{aligned} 1) \quad m_1 \cdot \vec{a} &= \vec{P}_1 + \vec{T}_1 & 2) \quad m_2 \cdot \vec{a} &= \vec{P}_2 + \vec{T}_2 \\ \vec{P}_1 &= m_1 \cdot \vec{g} & \vec{P}_2 &= m_2 \cdot \vec{g} \end{aligned}$$

$\vec{T}_1, \vec{T}_2$  - силы натяжения нитей.

Если пренебречь массой блока, то можно считать силы натяжения нитей с обеих сторон блока одинаковыми. Действительно, при равновесии блока  $\sum M_0 = 0$ , т.е.

$$T_1^1 \cdot r - T_2^1 \cdot r = 0 \quad \text{или} \quad T_1^1 = T_2^1.$$

$T_1 = T_1^1$  и  $T_2 = T_2^1$  по третьему закону Ньютона, поэтому  $T_1 = T_2$ .

С учетом равенства сил натяжения, записываем векторные равенства (1) и (2) в проекции на ось Y

$$-m_1 \cdot a = -P_1 + T_1 \quad (1)$$

$$m_2 \cdot a = T_2 - P_2 \quad (2)$$

Вычитая из равенства (2) равенство (1), будем иметь:  $(m_1 + m_2) \cdot a = P_1 - P_2$

$$a = \frac{P_1 - P_2}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

Таким образом, проверка второго закона Ньютона в данной работе заключается в проверке равенства (3), выведенного на основе второго закона Ньютона. Ускорение грузов можно определить по формуле пути равноускоренного движения, т.к. каждый раз система движется под действием постоянных сил:

$h = \frac{a \cdot t^2}{2} \rightarrow a = \frac{2 \cdot h}{t^2}$ , где  $h$  - измеряется по рейке,  $t$  - по показаниям секундомера.

Используя перегрузки, можно создавать разные  $P_1-P_2$  при постоянной  $m_1+m_2$  массе системы. Тогда очевидно, что

$$a_1 = \frac{(P_1 - P_2)_1}{m_1 + m_2}$$

$$a_2 = \frac{(P_1 - P_2)_2}{m_1 + m_2}, \text{ т.е. } \frac{a_1}{a_2} = \frac{(P_1 - P_2)_1}{(P_1 - P_2)_2} \text{ или, т.к. } a_1 = \frac{2 \cdot h_1}{t_1^2}$$

$$a_2 = \frac{2 \cdot h_2}{t_2^2}$$

$$\frac{(P_1 - P_2)_1}{(P_1 - P_2)_2} = \frac{h_1 \cdot t_2^2}{h_2 \cdot t_1^2} \quad (4)$$

Отвинтив нижние части грузов массой по 98г, можно изменить массу системы  $m_1+m_2$ , не изменяя  $P_1-P_2$ . Тогда будем иметь:

$$a_2 = \frac{P_1 - P_2}{(m_1 + m_2)_2}; \quad a_3 = \frac{P_1 - P_2}{(m_1 + m_2)_3}; \quad \frac{a_3}{a_2} = \frac{h_3 \cdot t_2^2}{h_2 \cdot t_3^2};$$

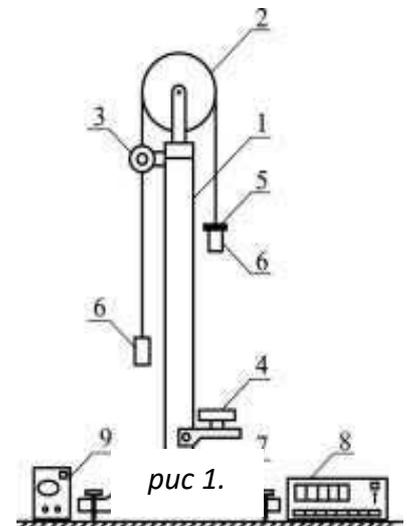
или

$$\frac{(m_1 + m_2)_2}{(m_1 + m_2)_3} = \frac{h_3 \cdot t_2^2}{h_2 \cdot t_3^2} \quad (5)$$

Следовательно, для проверки равенства (3) необходимо убедиться в верности соотношений (4) и (5).

### Описание установки

Установка состоит из вертикальной стойки 1 с сантиметровыми делениями, закрепленной на основании 7; свободно вращающегося блока 2, укрепленного на подшипнике; через блок перекинута нить с грузами 6 одинаковой массы; к грузам прилагаются четыре кольцевых перегрузка 5 массой по 2 гр; электромагнит 3 при включении зажимает нить, удерживающую грузы; миллисекундомер 8 включается при выключении электромагнита и выключается при касании груза площадки датчика 4; питание миллисекундомера и электромагнита осуществляется через лабораторный выпрямитель 9;



### Порядок выполнения работы

1. Включить лабораторный выпрямитель в сеть; проверить вертикальность установки рейки; проверить, свободно ли движется нить с грузами без перегрузков.
2. Установить правый груз в исходное состояние на высоту  $h$  (отметка 20 на шкале) и включить выпрямитель и электромагнит через него, который зажмет нить. Приподнять стопор датчика 4 нажатием пальца снизу вверх. Установит секундомер на 0000 нажатием кнопки «сброс» (белого цвета)
3. Для проверки равенства (4) на стальные грузы  $m=168\text{г}$  поместить перегрузки массой: справа  $\delta m_1=6\text{г}$ , слева  $\delta m_2=2\text{г}$ .
4. Выключить электромагнит (одновременно с этим включается секундомер). В момент удара о стопор секундомер выключится и покажет время движения  $t$  с высоты  $h$ .

- Привести установку в исходное положение, повторить измерение 3 раза. Результаты занести в первую строчку таблицы. Затем проделать то же самое, переложив перегрузок в 2 г слева направо. Результаты занести во вторую строчку таблицы.
- Для проверки равенства (5) нужно изменить массы путем отвинчивания нижних стальных грузов по 98г, не изменяя положения перегрузков, соответствующих второму опыту. Провести измерение 3 раза и заполнить третью строчку таблицы. *Желательно при проведении опытов высоту  $h$  не менять, т.к. Это упрощает расчеты.*
- используя данные таблицы проверить соотношения (4) и (5)

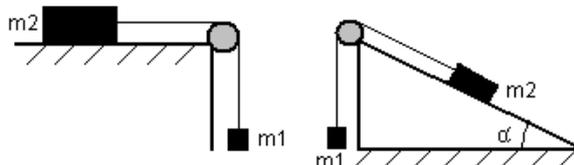
Таблица 1.

№	$m_1 = m + \Delta m_1$ (кг)	$m_2 = m + \Delta m_2$ (кг)	$m_1 + m_2$ (кг)	$P_1 - P_2$ (Н)	$t_1$ (с)	$t_2$ (с)	$t_3$ (с)	$t_{cp}$ (с)	$H$ (м)
1									
2									
3									

*Не забывайте после окончания работы привинтить нижние стальные грузы на свои места, поместить перегрузки по два на каждом из грузов, отключить секундомер и выпрямитель.*

#### Контрольные вопросы

- Сформулировать и записать второй закон ньютона.
- Дать определение прямолинейного равноускоренного движения точки ?
- Знать определения силы, массы, ускорения.
- Записать формулу для силы трения ?
- Дать схемы сил, действующих на тела и записать второй закон ньютона в скалярной форме для тел следующих систем.



$\mu$ - коэффициент трения между вторым телом и плоскостью

- Может ли тело находиться в равновесии, если на него действует несколько сил?
- Верно ли утверждение, что скорость тела зависит только от силы, действующей на тело?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### «ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПО ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБА»

**Цель работы:** определить модуль упругости материалов по деформации изгиба полос.

#### Теоретические основы работы

Деформация – это изменение объема или формы тела без изменения его массы под действием внешней силы. Все возможные виды деформации могут быть сведены к двум основным деформациям: растяжению (или сжатию) и сдвигу, называемым элементарными

деформациями. Деформации изгиба и кручения принадлежат к числу сложных деформаций. Их можно представить как сочетание элементарных деформаций, происходящих одновременно.

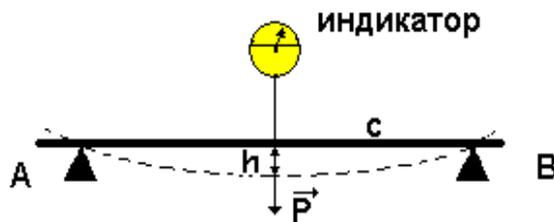


рис. 1

Если прямой упругий стержень обоими концами свободно положить на твердые опоры и нагрузить в середине грузом весом  $\vec{P}$ , то середина стержня опустится, т. е. стержень согнется (рис. 1)

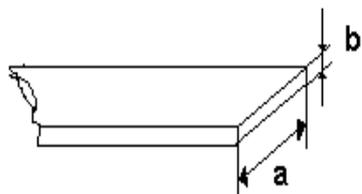
Несложно понять, что при таком изгибе верхние слои стержня будут сжиматься, нижние – растягиваться, а некоторый средний слой, который называют нейтральным слоем, сохранит длину и только претерпит искривление. Перемещение  $h$ , которое получает середина стержня, называется стрелой прогиба. *Стрела прогиба* тем больше, чем больше нагрузка. Кроме того, она зависит от формы и размеров стержня и от его модуля упругости.

Модулями упругости называются величины, характеризующие упругие свойства материалов. В данной работе мы исследуем Модуль продольной упругости (модуль Юнга)  $E$ , который характеризует способность материалов сопротивляться деформации растяжения.

При деформации изгиба упругая сила пропорциональна прогибу стержня, концы которого лежат на двух опорах (Закон Гука в случае сложных деформаций).

Закон Гука можно записать в виде:  $h = \beta \cdot P$  (1)

Расчеты (1) показывают, что прогиб



$$h = \frac{L^3}{4 \cdot a \cdot b^3 \cdot E} \cdot P \quad (2)$$

где  $L$  – расстояние между опорами,  
 $a$  – ширина полосы,  
 $b$  – ее толщина,  
 $E$  – модуль продольной упругости материала полосы.

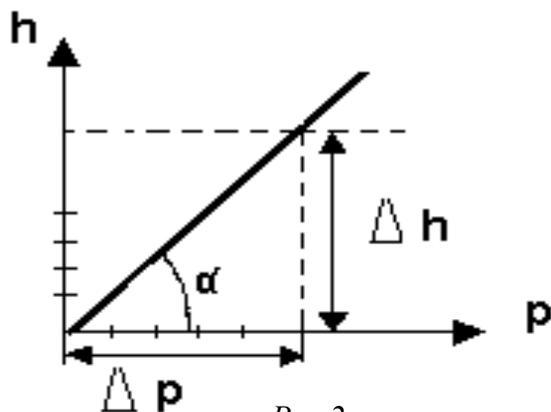


Рис 2

Если увеличить нагрузку  $P$ , то изменится и стрела прогиба  $h$ . Построив график  $h = h(P)$  (рис 2), можно убедиться в справедливости закона Гука:

$$\beta = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta h}{\Delta P} \quad (3)$$

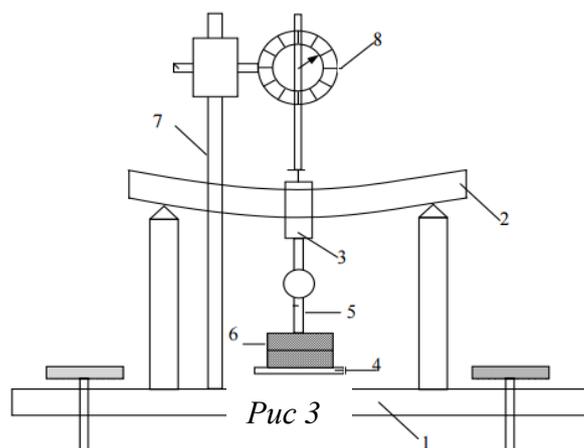
где  $\alpha$  угол наклона графика зависимости  $h = h(P)$ .

Из соотношений (2) и (3) можно получить выражение для модуля упругости  $E$ :

$$E = \frac{L^3}{4 \cdot a \cdot b^3} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta h} \quad (4)$$

### Описание установки

Станина 1 (рис. 3) состоит из основания с двумя стойками, на верхних концах которых имеются опорные призмы. На ребрах этих призм помещается испытуемый стержень 2. На середине стержня располагается кольцо 3, на которое подвешивается стержневой подвес 5 с площадкой для грузов 4. Площадка 4 последовательно нагружается имеющимися в комплекте гириями 6 ( $\Delta P = 1H$  в пределах от 1 до 10 H), тем самым изменяется изгибающая сила, действующая на стержень. Стрела прогиба измеряется индикатором часового типа 8, который укреплен на специальной стойке 7. Цена каждого деления индикатора равна 0,01 мм, т.о. один оборот стрелки равен 1 мм.



### Порядок выполнения работы

1. Измерить размеры исследуемого стержня (полосы) ширину  $a$  и толщину  $b$  и расстояние между опорами  $L$ , считать их средними значениями.
2. Увеличивая нагрузку  $P$  ступенями  $\Delta P = 1H$ , измерить соответствующие значения прогиба  $h$  и записать в таблицу:

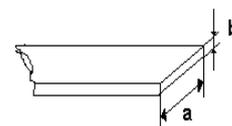


Таблица 1.

$P(H)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$h$ 10-2 (мм)										

3. Построить график  $h = h(P)$  и убедиться в справедливости закона Гука.
4. Используя график, найти отношение  $\frac{\Delta P}{\Delta h}$  и из соотношения (4) определить модуль упругости  $E$  и принять его за среднее значение  $\langle E \rangle$ .
5. Вычислить погрешность полученного значения:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left[\frac{\Delta(\Delta P)}{\Delta P}\right]^2 + \left[\frac{\Delta(\Delta h)}{\Delta h}\right]^2}$$

Абсолютную погрешность  $\Delta E$  находим по формуле:  $\Delta E = \varepsilon \langle E \rangle$ .

Окончательный результат записать в виде  $E = \langle E \rangle \pm \Delta E$

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Гука для деформации растяжения-сжатия.
2. Дайте определение модуля упругости.
3. Увеличивается или уменьшается прогиб при увеличении геометрических размеров сечения полосы?
4. Что такое абсолютное и относительное удлинения?
5. Что такое сила упругости?
6. Чему равна потенциальная энергия упругой силы?
7. Чему равна плотность энергии упругодеформированного тела?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНОГО ЗАКОНА ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ»

**Цель работы:** определить момент инерции маятника Обербека, проверить основной закон динамики вращательного движения твердого тела.

### Теоретические основы работы

Для выполнения работы необходимо знать определения:

- вращательного движения,
- угловой скорости,
- углового ускорения,
- момента силы относительно неподвижной оси,
- момента инерции точки относительно оси вращения,
- момента инерции тела, относительно оси вращения,
- содержание основного закона динамики вращательного движения твердого тела

В эксперименте исследуется вращательное движение закрепленной на оси системы тел, у которой может меняться момент инерции. Различные моменты внешних сил создаются грузами, подвешенными на нити, намотанной на шкив.

Основное уравнение вращательного движения твердого тела вокруг неподвижной оси  $z$  имеет вид

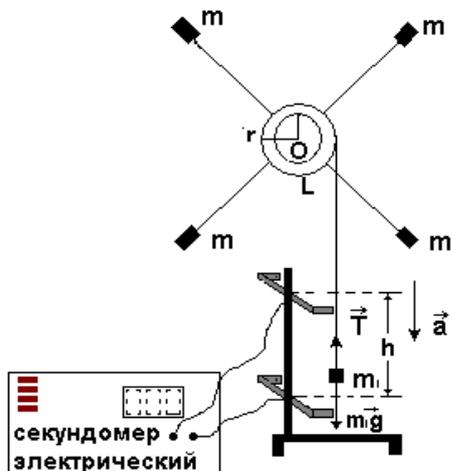
$$M = J \cdot \varepsilon, \text{ при } J = \text{const},$$

где  $M$  - момент силы относительно оси,

$J$  - момент инерции тела относительно оси,

$\varepsilon$  - угловое ускорение.

Для экспериментального доказательства этого соотношения в работе используется маятник Обербека (рис.1). Он состоит из четырех стержней и двух шкивов различного радиуса  $R$  и  $r$ , укрепленных на одной горизонтальной оси  $O$ . По стержням могут перемещаться и закрепляться в нужном положении четыре (по одному на каждом стержне) груза одинаковой массы  $m$ . Грузы закрепляются симметрично, т. е. так, чтобы центр тяжести совпадал с осью вращения.



При *рис.1* груза массы  $m_1$ , прикрепленного к концу намотанной на тот или иной шкив нити, маятник может приводиться во вращение.

Груз  $m_1$ , удерживаемый на высоте  $h$  над какой-либо поверхностью, обладает некоторой энергией  $m_1gh$ , где  $g$  - ускорение свободного падения. Если предоставить возможность грузу падать, то это падение будет происходить с ускорением  $a$ . При этом шкив со стержнями и расположенными на них грузами будет вращаться с угловым ускорением  $\varepsilon$ .

Движение груза описывается вторым законом Ньютона (пренебрегая силами трения и считая нить невесомой и нерастяжимой) в проекции на вертикальную ось

$$m_1 a = m_1 g - T$$

где  $T$  - сила натяжения шнура,

$m_1 g$  - сила тяжести груза.

Отсюда:

$$T = m_1 g - m_1 a = m_1 (g - a).$$

Сила  $T$  сообщает угловое ускорение вращающемуся телу. Момент этой силы равен:

$$M = Tr = m_1 (g - a)r$$

где  $r$  - радиус шкива.

Движение груза  $m_1$  является равноускоренным без начальной скорости. Ускорение его можно определить из формулы:

$$h = \frac{a \cdot t^2}{2} \Rightarrow a = \frac{2 \cdot h}{t^2}$$

Зная формулу связи линейного и углового ускорения можно определить  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{2 \cdot h}{t^2 \cdot r}$$

При опытной проверке основного уравнения динамики вращательного движения нам необходимо убедиться в том, что момент инерции вращающейся системы остается постоянным при разных  $m$  и  $\varepsilon$ .

меняя массу груза  $m_1$  и используя шкивы разных радиусов, можно задавать различные моменты силы натяжения, а, следовательно, и различные угловые ускорения.

### Порядок выполнения работы

1. Измерить при помощи штангенциркуля диаметры большого и малого шкива и определить их радиусы  $R$  и  $r$ .
2. Измерить расстояние  $h$  между фотоэлементами.
3. Определить массу груза  $m_1$ , (т.к. груз сборный, суммируется масса, указанная на грузе).
4. Намотать на шкив радиусом  $R$  нить с грузом  $m_1$  так, чтобы груз был над верхним фотоэлементом. Предоставив возможность грузу падать, измерить время падения по электронному секундомеру, который автоматически включается и отключается при прохождении груза мимо верхнего и нижнего фотоэлемента (соответственно). Опыт повторить 3 раза. Результаты измерений записать в таблицу 1.
5. Вычислить  $t_{cp}$ , момент силы натяжения, угловое ускорение. Заполнить первую строку таблицы.
6. Повторить опыт и вычисления, увеличив массу  $m_1$  в 2 раза при неизменном радиусе шкива  $R$ . Заполнить вторую строку таблицы.
7. Повторить опыт и вычисления, используя шкив радиусом  $r$ , а груз такой же, как и во втором опыте. Заполнить третью строку таблицы.

№	$R$ ( $r$ ) ( $m$ )	$m_1$ ( $кг$ )	$h$ ( $m$ )	$t$ ( $c$ )	$\varepsilon$ ( $c^{-2}$ )	$M$ ( $H \cdot m$ )	$J = \frac{M}{\varepsilon}$ ( $кг \cdot m^2$ )
1				$t_1 =$			
				$t_2 =$			
				$t_3 =$			
				$t_{cp} =$			
2				$t_1 =$			
				$t_2 =$			
				$t_3 =$			
				$t_{cp} =$			
3				$t_1 =$			
				$t_2 =$			
				$t_3 =$			
				$t_{cp} =$			

8. Сделать вывод о инерционных свойствах маятника

Ввод записать в форме:

По результатам измерений и расчетов получено значение момента инерции маятника Обербека

$$J_1 = \dots \quad (r = \dots, m = \dots, M = \dots)$$

$$J_2 = \dots \quad (r = \dots, m = \dots, M = \dots)$$

$$J_3 = \dots \quad (r = \dots, m = \dots, M = \dots)$$

(момент инерции – *зависит* или *не зависит* от момента внешних сил) и верно ли утверждение

$$\frac{M_1}{\varepsilon_1} = \frac{M_2}{\varepsilon_2} = J$$

### Контрольные вопросы

1. Что такое вращательное движение?
2. Что называется угловой скоростью и угловым ускорением?
3. Как определяется момент силы относительно оси?
4. Как определяется момент силы относительно точки  $O$ ?
5. Что такое момент инерции тела относительно оси?
6. Как формулируется основной закон динамики поступательного и вращательного движений?
7. Как определяется кинетическая энергия тела при поступательном и вращательном движениях?
8. 8. Чему равно тангенциальное и нормальное ускорения точки тела при вращательном движении?
9. Зачем у маховика делается утолщение?
10. Почему вращение не останавливается, когда механизм проходит мертвое положение?

СОПОСТАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И ЗАКОНОВ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЙ	
поступательное движение	вращательное движение
перемещение $\Delta \vec{r}$	угловое перемещение $\Delta \varphi$
линейная скорость $\vec{V} = \frac{d\vec{r}}{dt}$	угловая скорость $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$
линейное ускорение $\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$	угловое ускорение $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$
масса $m$	момент инерции $J$
сила $\vec{F}$	момент силы $M$ относительно оси
импульс тела $\vec{p} = m \cdot \vec{V}$	момент импульса относительно оси $L_X = J_X \omega$
основной закон динамики $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ , $\vec{F} = \frac{d(m\vec{V})}{dt}$	основной закон динамики $M_X = J_X \cdot \varepsilon$ , $M_X = \frac{d(J_X \omega)}{dt}$
работа $A = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r}$	работа $A = M \cdot \varphi$

кинетическая энергия $E = \frac{mV^2}{2}$	кинетическая энергия $E = \frac{J\omega^2}{2}$
закон сохранения импульса $\vec{p} = const$ $\sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = const$	закон сохранения момента импульса относительно оси $L_x = const, J_x \omega = const$

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ**  
**«МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА»**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА**

**«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ  
ПО СТОКСУ»**

**Цель работы:** изучить метод определения вязкости, закрепить навык пользования микрометром.

**Теоретические основы работы**

Этот метод определения вязкости основан на измерении скорости падения в жидкости небольших тел сферической формы. В работе изучается движение свинцового шарика в вязкой жидкости, происходящее под влиянием нескольких сил: силы тяжести ( $mg$ ), выталкивающей силы:

$$F_e = \rho_{ж} gV = \rho_{ж} g \frac{\pi d^3}{6} \quad (1)$$

и силы сопротивления, действующей со стороны вязкой жидкости на движущееся в ней тело.

При движении шарика слой жидкости, граничащий с его поверхностью, «прилипает» к шарiku и движется со скоростью шарика. Ближайшие смежные слои жидкости также приводят в движение, но получаемая ими скорость тем меньше, чем дальше они находятся от шарика. Таким образом, при вычислении сопротивления среды, следует учитывать трение отдельных слоев жидкости друг о друга, а не трение шарика о жидкость.

Для тела шарообразной формы и для случая малых скоростей сила внутреннего трения выражается **формулой Стокса**:

$$F_c = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v = 3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot v$$

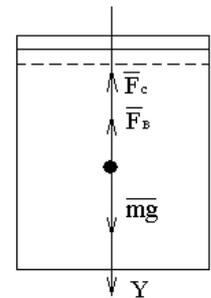
При установившемся движении шарик движется с постоянной скоростью, при этом ускорение  $\vec{a} = 0$ . Запишем второй закон Ньютона для движения шарика:

$$m\vec{g} + \vec{F}_b + \vec{F}_c = m\vec{a} = 0 \quad (2)$$

Найдем проекции сил на ось OY:

$$mg - F_b - F_c = 0$$

$$mg - \rho_{ж} g \frac{\pi d^3}{6} - 3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot v = 0 \quad (3)$$



Решая это уравнения относительно коэффициента вязкости, найдем:

$$\eta = \frac{(6m - \pi d^3 \rho_{ж})g}{18\pi \cdot d \cdot v} \quad (4)$$

Учитывая, что

- масса шарика  $m = \frac{\pi d^3 \rho}{6}$ , где  $\rho$  - плотность вещества шарика;

-  $v = \frac{L}{t}$ , где  $v$  - скорость движения;  $L$  - путь,  $t$  - время установившегося движения;

получите окончательную расчетную формулу для коэффициента вязкости:

$$\eta = \frac{d^2(\rho - \rho_{ж})gt}{18L} \quad (5) \quad \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} \right]$$

где  $d$  - диаметр шарика;  $\eta$  - коэффициент внутреннего трения жидкости;  $\rho$  - плотность вещества шарика,  $\rho_{ж}$  - плотность жидкости;  $L$  - путь,  $t$  - время установившегося движения,  $g$  - ускорение свободного падения.

### Порядок выполнения работы

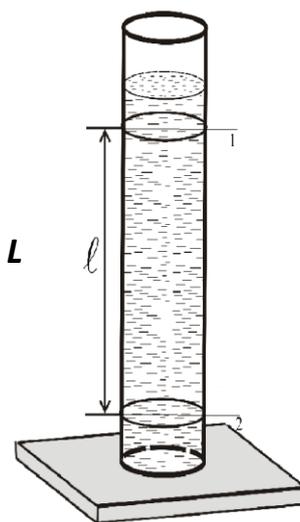
1. Выписать необходимые теоретические данные, рабочие формулы (с выводом), данные установки (схему), условия опыта.
2. Наблюдение. В стеклянный сосуд, наполненный испытуемой жидкостью (касторовое масло, глицерин), опустить свинцовый шарик. Сначала шарик движется ускоренно, но ускоренное движение быстро переходит в равномерное - это происходит на глубине 5-7 см. На этой глубине установлена метка 1 (когда шарик проходит эту метку, включаем секундомер).
3. В нижней части сосуда установлена метка 2 (когда шарик проходит через нее, секундомер выключаем). Расстояние

между метками  $L$ , пройдено за время  $t$ , откуда  $v = \frac{L}{t}$ .

4. Измерить при помощи линейки расстояние  $L$  между метками, записать данные в таблицу\*.
5. Измерить при помощи микрометра диаметр шарика, записать данные в таблицу\*.
6. Опустить измеренный шарик в стеклянный сосуд, наполненный испытуемой жидкостью (касторовое масло или глицерин), зафиксировать время движения шарика между метками при помощи секундомера.
7. Произвести по три измерения для каждой среды (поочередно измеряя шарики и замеряя по секундомеру время движения шариков),
8. Вычислить по формуле (5) коэффициент вязкости для каждого случая, а также среднее значение коэффициента для каждой жидкости.
9. Вычислить кинематический коэффициент вязкости касторового масла и глицерина по

$$\text{формуле } \nu = \frac{\eta_{ср}}{\rho_{ж}}.$$

Измерения и вычисления занесите в таблицу:



	№	L, м	t, с	d, м	$\rho_{св},$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho_{ж},$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\eta,$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}}$	$\eta_{ср},$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}}$	$\nu,$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\varepsilon,$ %
МАС ЛО	1									
	2									
	3									
ГЛИ ЦЕР ИН	4									
	5									
	6									

10. Вычислить погрешности расчетов по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \ell}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_{жс}}\right)^2} + 4\left(\frac{\Delta d}{\langle d \rangle}\right) \cdot 100\%$$

*При вычислениях используйте следующие данные\*:*

$$\Delta g = 0,05 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, \Delta t = 0,005 \text{с}, \Delta l = 0,5 \text{мм}, \Delta \rho = 0,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \Delta d \approx 0,005 (\text{мм}).$$

Плотность касторового масла:  $\rho_{м} = 0,97 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$

Плотность глицерина:  $\rho_{гл} = 1,260 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$

Плотность свинца:  $\rho_{св} = 11,22 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$

*\* все размерности должны быть переведены в «СИ».*

### Контрольные вопросы

1. Объясните сущность механизма внутреннего трения в жидкостях, газах, разреженных газах.
2. Выведите формулу (5) для определения коэффициента вязкости методом Стокса (какие силы действуют на шарик при его движении?).
3. Приведите примеры установившегося движения в вязкой среде.
4. Приведите определения, назовите размерность и единицы измерений коэффициентов динамической вязкости и кинематической вязкости.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

#### «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ГАЗА И СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА»

**Цель работы:** экспериментальное определение коэффициента внутреннего трения воздуха, определение длины свободного пробега молекул воздуха.

#### Теоретические основы работы

Группа явлений, обусловленных хаотическим движением молекул и приводящим при этом к передаче массы, импульса и количества теплоты, получила название **явлений**

**переноса.** К явлениям переноса относят диффузию (перенос вещества), теплопроводность (перенос количества теплоты), внутренне трение (перенос импульса).

**Вязкость (внутренне трение)** – это свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой.

Например, в случае протекания жидкости или газа в прямолинейной трубке круглого сечения (капилляре) при малых скоростях потока движение является **ламинарным**, т.е. поток движется отдельными слоями, причем эти слои имеют разные скорости (*при увеличении скорости потока движение становится турбулентным (вихревым)*).

Вследствие хаотического движения молекулы жидкости или газа переходят из слоя в слой, передавая импульс друг другу. При переходе из слоя с большей скоростью направленного движения в слой с меньшей скоростью и наоборот, молекулы переносят в другой слой свой импульс направленного движения. В результате первый слой тормозится, а второй – ускоряется, между слоями возникает сила внутреннего трения.

Сила трения, действующая на участок поверхности плоского слоя площадью  $S$ , выражается феноменологическим (полученным путем обобщения опытных данных) соотношением:

$$F_{тр} = -\eta \frac{dv}{dx} S \quad (1.1)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость (вязкость или **коэффициент внутреннего трения**), в

системе "СИ" измеряется в  $[\eta] = \text{Па}\cdot\text{с}$ . Величина  $gradv = \frac{dv}{dx}$  называется градиентом

скорости упорядоченного движения, характеризует направление наибольшего изменения скорости и показывает изменение скорости, приходящееся на единицу длины в направлении переноса. знак «минус» указывает, что перенос импульса осуществляется в направлении убывания скорости.

Методами молекулярно-кинетической теории идеального газа получено выражение для коэффициента внутреннего трения:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \quad (1.2)$$

где  $\langle v \rangle$  – средняя скорость теплового движения молекул идеального газа,

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$$

$\mu$  – молярная масса;  $T$  – температура;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $\langle \lambda \rangle$  – средняя длина свободного пробега молекул, вычисленная по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi r^2 n} \quad (1.3)$$

где  $n$  – число молекул в единице объема (концентрация),  $r$  – эффективный радиус молекулы.

### Вывод расчетных формул

Для определения коэффициента внутреннего трения воздуха в лабораторной работе используется метод Пуазейля, который основан на ламинарном течении жидкости или газа в тонком капилляре.

Объем протекающего за время  $\tau$  воздуха определяется формулой Пуазейля:

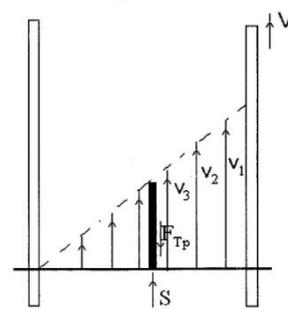


Рис.1

$$V = \frac{1}{\eta} \frac{\pi r_0^4}{8l} (P_1 - P_2) \tau \quad (1.4),$$

где  $l$  - длина капилляра,  $r_0$  – радиус капилляра,  $(P - P_1)$  – разность давлений на его концах, определяется с помощью манометра, объем протекающего через капилляр воздуха определяют с помощью реометра.

Из формулы Пуазейля (1.4) выразим коэффициент внутреннего трения (вязкость) воздуха  $\eta$  :

$$\eta = \frac{\pi r_0^4 (P_1 - P_2)}{8lQ} \quad (1.5)$$

где разность давлений  $P_1 - P_2 = \rho g(h_1 - h_2)$  (1.6),  $h_1 - h_2$  - разность уровней воды в манометре;  $\tau$  - время,  $\rho$  - плотность воды;  $g$  - ускорение силы тяжести,  $Q$  определяется показаниями реометра:

$$Q = \frac{V}{\tau}$$

Из (1.2) получаем выражение для средней длины свободного пробега молекул воздуха:

$$\lambda = \frac{3\eta}{\rho \langle v \rangle} \quad (1.7)$$

Здесь, как и ранее средняя скорость теплового движения молекул:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$$

Плотность газа определяем, используя уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$\rho = \frac{m}{V} = P \frac{\mu}{RT}$$

Давление воздуха в отборной камере практически равно атмосферному давлению  $P = P_{\text{АТМ}}$ , определяем по лабораторному барометру.

Подставив в (1.7) выражения для  $\rho$  и  $v$  получим:

$$\lambda = \frac{3\eta}{P_{\text{АТМ}} \frac{\mu}{RT} \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}}$$

или

$$\lambda = 1,88 \frac{\eta}{P_{\text{АТМ}}} \sqrt{\frac{RT}{\mu}} \quad (1.8)$$

### Описание установки

Лабораторная установка ФТП 1-1 (рис.2) представляет собой конструкцию настольного типа, состоящую из трех основных частей: приборного блока (1), блока рабочего элемента (2) и стойки.

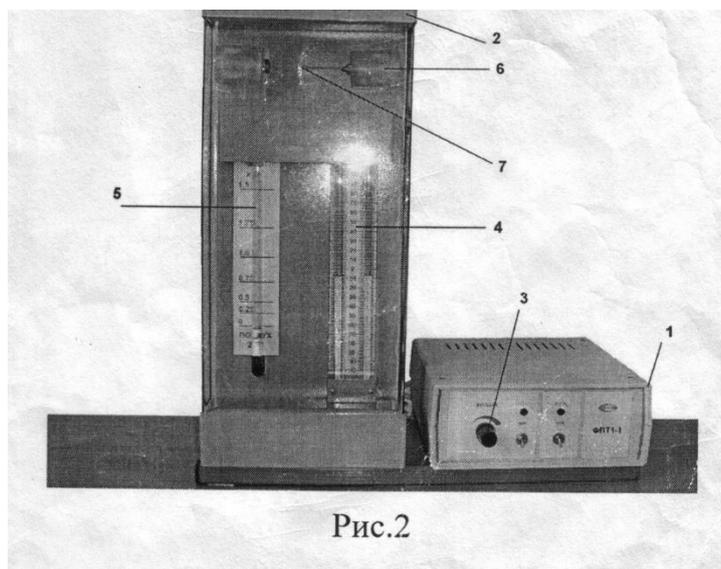


Рис.2

На лицевой панели приборного блока (рис.3) находятся органы управления и регулирования установки: модуль питания «СЕТЬ» с тумблером включения питания и лампой индикации; модуль «ВОЗДУХ» с тумблером включения микрокомпрессора, лампой индикации и регулятором расхода воздуха (3).

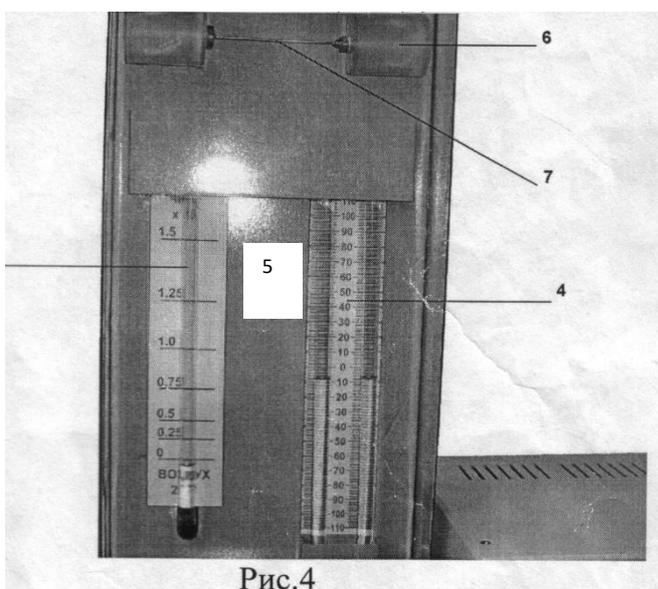


Рис.4

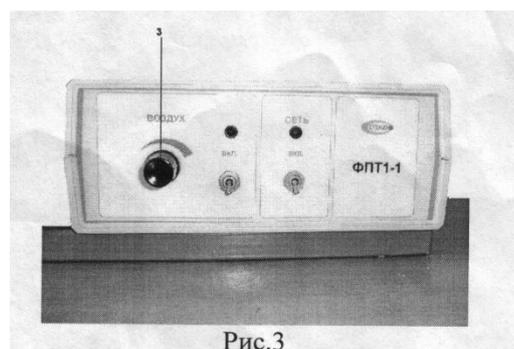
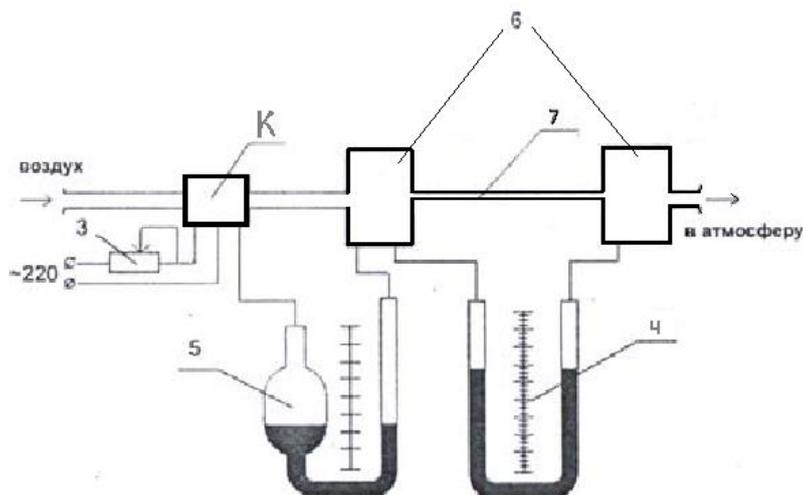


Рис.3

В состав блока рабочего элемента (рис.4) входят: рабочий элемент (металлический капилляр (7), закрепленный между отборными камерами (6)), реометр (5) и манометр (4).  
Схема экспериментальной установки:



Через капилляр прокачивается воздух при помощи микрокомпрессора *K*, расход которого определяется по реометру. Управление работой микрокомпрессора *K* осуществляется потенциометром *З* (регулятором расхода воздуха). Перепад давления в капилляре измеряется манометром, присоединенный к отборным камерам.

Микрокомпрессор и реометр закреплены на стойке и соединяются между собой резиновой трубкой.

#### Порядок выполнения работы

1. Выписать необходимые теоретические данные, рабочие формулы, данные установки, условия опыта.
2. Подать на установку питание, включив тумблер «СЕТЬ».
3. Включить тумблер «ВОЗДУХ».
4. Плавно вращая регулятор расхода воздуха (3) в модуле «ВОЗДУХ», устанавливать расход воздуха за единицу времени в интервале от 0,25 до 1,25, каждый раз производя измерения разности уровней воды в манометре\*\*.
5. Повторить измерение 5-6 раз, меняя расход воздуха. Показания ( $h_1 - h_2$ ) записать в таблицу.
6. Вычислить вязкость воздуха по формуле (1.5). Найти среднее значение  $\langle \eta \rangle$ .
7. Определить абсолютную и относительную погрешности измерения коэффициента

вязкости:  $\Delta \eta = |\eta_T - \eta_{\text{э}}|$ ,  $\varepsilon = \frac{|\eta_T - \eta_{\text{э}}|}{\eta_T} \cdot 100\%$ .

8. Считать  $\eta_{\text{э}} = \langle \eta \rangle$ .
9. Определить давление воздуха в лаборатории (по барометру) и температуру воздуха (по термометру).
10. Вычислить длину свободного пробега молекул воздуха по формуле (1.8), приняв  $\eta = \langle \eta \rangle$

**Таблица результатов измерений**

№	$V_t; 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$	$(h_1 - h_2) \text{ мм}$	$(P_1 - P_2) \text{ Па}$	$\eta$	$\langle \eta \rangle$	$\langle \lambda \rangle, \text{ м}$
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						

При вычислениях используйте следующие данные\*:

- Длина капилляра:  $l = 10\text{см}$ ;
- Радиус капилляра:  $r_0 = 0,5\text{ мм}$ ;
- $Q = \frac{V}{\tau}$  - определяется показаниями реометра
- Атмосферное давление  $P_{\text{АТМ}}$  – по лабораторному барометру.
- $T$  – определяется по лабораторному термометру  $t^\circ$  и переводится в К.
- $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$  (универсальная газовая постоянная).
- $\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$  (для воздуха).
- Табличное значение  $\eta_T = 18,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

\* все размерности должны быть переведены в СИ.

#### Контрольные вопросы

1. Какие явления носят общее названия явлений переноса?
2. В чем сущность явлений диффузии, внутреннего трения, теплопроводности с молекулярной точки зрения?
3. Что такое средняя длина свободного пробега молекул в газе? Может ли она быть измерена на опыте?
4. Каков физический смысл коэффициентов диффузии, вязкости, теплопроводности?
5. Какие существуют связи между различными коэффициентами переноса?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ $C_p/C_v$ ДЛЯ ВОЗДУХА»

**Цель работы:** экспериментальное определение показателя адиабаты  $C_p/C_v$  для воздуха методом Клемана-Дезорма.

#### Теоретические основы работы

Адиабатным (адиабатическим) называют термодинамический процесс, происходящий в термодинамической системе без подвода теплоты. Первое начало термодинамики для термодинамического процесса имеет вид:

$$dQ = dU + dA \quad (1.1)$$

(количество теплоты  $dQ$ , переданное системе (например, газу), расходуется на приращение внутренней энергии  $dU$  системы и совершение системой работы  $dA$  над внешними телами). Здесь  $dQ$  – бесконечно малое количество теплоты, подводимое к термодинамической системе,  $dU$  – бесконечно малое изменение внутренней энергии системы,  $dA$  – бесконечно малая работа, совершаемая термодинамической системой в результате данного процесса.

Для адиабатного процесса соотношение (1.1) примет вид:

$$dU + dA = 0 \quad (1.2)$$

Для одного моля идеального газа имеем:

$$dU = C_v \cdot dT \quad (1.3),$$

$$dA = p \cdot dV \quad (1.4).$$

Здесь  $C_v$  – молярная теплоемкость при постоянном объеме газа,  $P$  – давление,  $dT$  и  $dV$  – бесконечно малые (величины) изменения температуры и объема соответственно. Подставляя (1.3) и (1.4) в (1.2), получим:

$$C_v dT + p dV = 0 \quad (1.5)$$

Для одного моля идеального газа запишем уравнение Менделеева-Клапейрона:  $PV = RT$ .

Дифференцируя его, найдем связь между параметрами  $dp$ ,  $dV$ ,  $dT$ :

$$d(pV) = d(RT)$$

$$p dV + V dp = R dT \quad (1.6).$$

Из (1.6) получим:

$$dT = \frac{1}{R}(pdV + Vdp) \quad (1.7).$$

Подставляя (1.7) в (1.5) получим дифференциальное уравнение, связывающее объем и давление идеального газа в адиабатном процессе:

$$(C_V + R) \cdot pdV + C_V Vdp = 0 \quad (1.8)$$

Учитывая, что  $C_V + R = C_P$  – молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении, из (1.8) получим:

$$\frac{C_P}{C_V} \cdot \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0 \quad (1.9)$$

Известно, что для идеального газа молярные теплоемкости  $C_P$  и  $C_V$  не зависят от температуры:

$$C_P = \frac{i+2}{2}R, \quad C_V = \frac{i}{2}R \quad (1.10);$$

(здесь  $i$  – число степеней свободы молекулы идеального газа). Считая воздух при атмосферном давлении идеальным газом, получаем, что показатель  $C_P/C_V$  – постоянная для идеального газа величина и называется показателем адиабаты (показателем Пуассона):  $\gamma = C_P/C_V$ . В этом случае решение дифференциального уравнения (1.10) имеет вид:

$$pV^\gamma = const \quad (1.11),$$

(в этом можно убедиться непосредственной постановкой).

Уравнение (1.11) называют уравнением адиабаты (уравнением Пуассона).

#### Описание установки и вывод расчетных формул

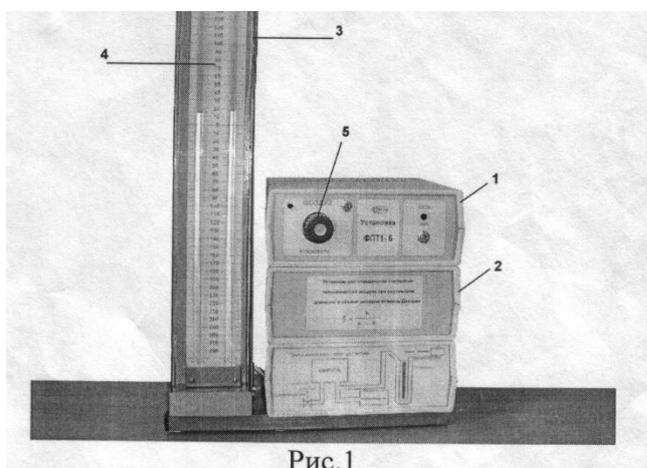


Рис.1

Экспериментальная установка (рис.1) состоит из манометра (4), и приборного блока (1, 2) закрепленных на стойке (3).

Внутри приборного блока находится стеклянный баллон, соединенный с манометром и компрессор для нагнетания воздуха (схема установки приведена внизу на панели приборного блока). На панели приборного блока расположены тумблер «СЕТЬ» с сигнальной лампой, тумблер «ВОЗДУХ» (включение-выключение подачи воздуха) и пневмотумблер

«АТМОСФЕРА»(5), с помощью которого баллон может быть кратковременно соединен с атмосферой. Поперечное сечение клапана в пневмотумблере достаточно велико и процесс установления атмосферного давления в сосуде происходит быстро. Быстрое изменение давления в сосуде происходит практически без теплообмена с окружающей средой, поэтому процесс, происходящий при открытии клапана пневмотумблера, с достаточной точностью можно считать адиабатным.

Пусть с помощью компрессора в баллон накачали воздух. Через несколько минут, после того как давление в манометре перестанет меняться, температура воздуха в баллоне станет равной температуре в лаборатории. Обозначим эту температуру  $T_1$ , давление воздуха в баллоне  $P_1$  при этом равно:

$$P_1 = P_0 + P' \quad (1.12)$$

здесь  $P_0$  – атмосферное давление,  $P'$  - избыточное давление воздуха, которое можно определить по показаниям манометра.

Выберем мысленно в сосуде объем  $V$  вдали от клапана. Будем считать, что число молекул в этом «объеме» неизменно. Начальное состояние воздуха в объеме характеризуется параметрами  $T_1, P_1, V_1$ . Если открыть на короткое время клапан пневмотумблера, то часть воздуха выйдет из сосуда, давление станет равным  $P_2 = P_0$ , выбранный нами «объем» увеличится до значения  $V_2$ . Температура воздуха понизится, так как при вытекании из сосуда воздух совершает работу против давления окружающего баллона воздуха. Таким образом,  $T_1 < T_2$ . В тот момент времени, когда клапан закрывается, состояние «объема» характеризуется параметрами  $P_2, T_2, V_2$ .

Считая переход из состояния 1 в состояние 2 адиабатным процессом, из (1.12) получим:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \quad (1.13).$$

После того как клапан закрылся, происходит изохорный процесс теплообмена с окружающей средой, температура воздуха приближается к температуре в лаборатории  $T_1$ , давление воздуха по окончании этого процесса повышается:

$$P_3 = P_0 + P'' \quad (1.14),$$

где  $P''$  измеряется по манометру. Параметры воздуха после окончания изохорного процесса  $P_3, T_1, V_3$ . Причем  $V_3 = V_2$ .

Так как температура в первом и третьем состоянии одинаковы, а число молекул в выбранном нами «объеме» постоянно (объем выбран вдали от клапана), то для состояний 1 и 3 можно применить закон Бойля – Мариотта:

$$P_1 V_1 = P_3 V_3 = P_3 V_2 \quad (1.15)$$

Решая систему уравнений (1.13), (1.15), получим  $(P_3/P_1)^\gamma = P_2/P_1$ .

$$\text{Прологарифмировав это соотношение, найдем } C_P/C_V = \frac{\ln(1 + \frac{P'}{P_0})}{\ln(1 + \frac{P''}{P_0})}.$$

Используя соотношения (1.12) и (1.14), получим:

$$C_P/C_V = \frac{\ln(1 + \frac{P'}{P_0})}{\ln(1 + \frac{P' - P''}{P_0})} \quad (1.16)$$

Так как избыточное давление  $P'$  и  $P''$  весьма малы по сравнению с атмосферным давлением, можно использовать разложение функции типа  $\ln(1+x)$  в ряд, ограничившись первым членом разложения (при  $x \ll 1$ )  $\ln(1+x) \approx x$

Отсюда из (1.16) получаем:

$$\frac{C_P}{C_V} = \frac{P'}{P' - P''} \quad (1.17)$$

Избыточное давление, определяемое по манометру, можно выразить соотношением:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (1.18),$$

где  $h$  – разность уровней жидкости в манометре,  $\rho$  – плотность жидкости.

Из (1.17) и (1.18) получаем:

$$C_P/C_V = \frac{H}{H - h} \quad (1.19)$$

$$C_P/C_V = \frac{1}{1 - \frac{h}{H}} \quad (1.20)$$

Здесь  $H$  и  $h$  – разности уровней жидкости в манометре в первом и третьем состояниях.

### Порядок выполнения работы

1. Выписать необходимые теоретические данные, рабочие формулы, данные установки (схему), условия опыта.
2. Подать на установку питание, включив тумблер в модуле «СЕТЬ» (при этом загорается сигнальная лампа)
3. Включить подачу воздуха в рабочий элемент тумблером «ВОЗДУХ» и дождаться, чтобы разность уровней жидкостей в манометре (4) стала равной 25-30 см., после чего отключить подачу воздуха.
4. Выждать 2 минуты (пока температура воздуха в баллоне не станет равной температуре окружающего воздуха). Снять показания манометра (по нижнему уровню мениска определить уровни жидкости  $H_1$  и  $H_2$  в коленах манометра), вычислить разность уровней  $H = H_1 - H_2$  (согласно шкале прибора), записать значения в таблицу\*.
5. На короткое время соединить баллон с атмосферой быстрым поворотом пневмотумблера «АТМОСФЕРА» по часовой стрелке до щелчка. Через 1-2 минуты (после того как уровни жидкости в манометре стабилизируются), определить уровни  $h_1$  и  $h_2$ , вычислить разность уровней  $h = h_1 - h_2$  (согласно шкале прибора), записать значения в таблицу\*.

<i>№ опыта</i>	$H = H_1 - H_2$	$h = h_1 - h_2$	$\gamma = (C_p/C_v)$	$\gamma_{cp}$
1				
2				
3				

6. Повторить опыт (пункты 2-4) три - пять раз.

**Примечание:** подачу воздуха осуществлять внимательно, чтобы нижний уровень жидкости не достиг колена манометра или верхний не вышел из зоны шкалы прибора.

7. Вычислить показатель адиабаты  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  для каждого опыта по формуле (1.19) или (1.20). Заполнить таблицу.
8. Сравнить полученный результат ( $\gamma_{\text{э}}$ ) с теоретическим ( $\gamma_{\text{т}}$ )\*, считая воздух двухатомным газом.

9. Вычислить относительную погрешность  $\varepsilon = \frac{\gamma_{\text{т}} - \gamma_{\text{э}}}{\gamma_{\text{т}}}$

**Таблица 1.**

\* $\gamma_{\text{т}}$  для двухатомного газа 1,4

### Контрольные вопросы

1. Проанализируйте каждый из процессов при переходе от 1<sup>го</sup> ко 2<sup>му</sup> и 3<sup>му</sup> состоянию газа. Напишите соотношения, связывающие параметры  $C_p$ ,  $C_v$  и  $R$  в этих процессах.
2. В чем физическая причина различия значений теплоёмкости  $C_p$  и  $C_v$  для случая идеального газа.
3. Запишите и проанализируйте уравнение Майера.
4. Напишите выражение теплоёмкости идеального газа через степени свободы.

5. Напишите соотношение между параметрами  $P$  и  $V$ ;  $P$  и  $T$ ;  $V$  и  $T$  для адиабатного процесса.
6. Дайте определение адиабатического процесса. Приведите примеры.
7. Как, используя адиабатический процесс, можно найти отношение  $C_p/C_v$ ?
8. Чему равна работа, совершаемая идеальным газом при адиабатическом процессе? При изотермическом процессе?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

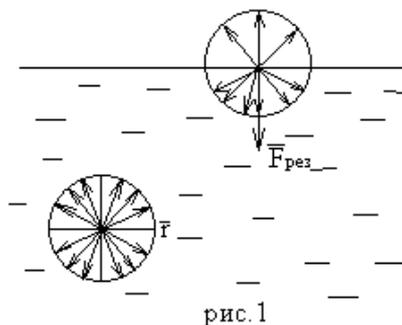
### «ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ ЛАПЛАСА»

**Цель работы:** экспериментальное определение коэффициента поверхностного натяжения методом компенсации разности давлений.

#### Теоретические основы работы

Вещество, находящееся в жидком состоянии обладает большей плотностью, чем в газообразном состоянии. Большое внутреннее давление в жидкости обеспечивает:

- а) малую сжимаемость жидкости;
- б) особое состояние поверхностного слоя – поверхностное натяжение.



Перечисленные свойства жидкостей объясняются значительными силами сцепления между молекулами. Каждая молекула внутри жидкости испытывает притяжение со стороны соседних молекул, находящихся в сфере молекулярного действия, центр которой совпадает с центром данной молекулы (например, сфера радиуса  $r$ ).

Равнодействующая всех сил, действующих на молекулу, находящуюся внутри жидкости далеко от поверхности, равна нулю. Молекула в поверхностном слое испытывает действие силы  $\vec{F}_{рез}$ , направленной внутрь жидкости, т.к. внутри сферы молекулярного действия плотность пара во много раз меньше плотности жидкости.

Потенциальная энергия молекул поверхностного слоя стремится к минимуму за счет стремления самого слоя к наименьшей поверхности, ведь молекулы поверхностного слоя стремятся уйти внутрь жидкости.

Коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  численно равен силе поверхностного натяжения, приходящейся на единицу длины контура, ограничивающего поверхность:

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad (1)$$

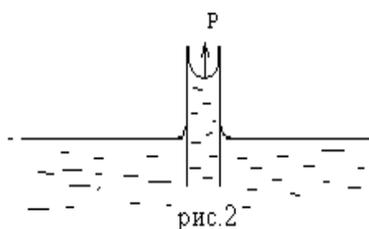
Силы молекулярного сцепления в поверхностном слое направлены внутрь массы жидкости. Жидкость, если другие, действующие на неё силы малы по сравнению с молекулярными, принимает сферическую форму.

Действие сил молекулярного давления, под влиянием которых жидкость представляет сферическую поверхность, аналогично действию сил, которые возникли бы при растянутой поверхности жидкости в пленку, стремящуюся сжаться.

Предлагаемый метод определения коэффициента поверхностного натяжения состоит в компенсации разности давлений поверхностного слоя жидкости. Под искривлённой поверхностью жидкости всегда существует добавочное молекулярное давление, направленное к центру кривизны поверхности и определяемое по формуле Лапласа:

$$P = \pm \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

где  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения,  $R_1$  и  $R_2$  - радиусы кривизны двух любых взаимно перпендикулярных нормальных сечений поверхности жидкости в данной точке.



По этой причине во всякой капиллярной цилиндрической трубке смачивающая жидкость поднимается выше уровня жидкости в сосуде: поверхность мениска в ней имеет форму полусферы радиуса  $R$ , тогда:  $R=R_1=R_2$  и давление  $P$  направленно против атмосферного давления

$$P = \frac{2\sigma}{R} \quad (3)$$

Если тем или иным способом увеличить внешнее давление над поверхностью жидкости в капилляре, то можно достигнуть такого положения, при котором уровни жидкости в сосуде и капилляре сравняются. Внешнее давление надо увеличить на  $P = \frac{2\sigma}{R}$

Определив величину избыточного давления и радиус капилляра, можно найти коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Если избыточное давление измерять жидкостным манометром, то  $P = \rho gh$ , где  $h$  - разность уровней жидкостей в манометре;  $\rho$  - плотность жидкости в манометре;  $g$  - ускорение силы тяжести.

Следовательно:  $\frac{2\sigma}{R} = \rho gh$ , тогда коэффициент поверхностного натяжения рассчитывается по формуле:

$$\sigma = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot R}{2} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot d}{4} \quad (4).$$

#### Описание установки

Капилляр  $K$ , погруженный в сосуд  $C$  с исследуемой жидкостью при помощи трубки сообщается с жидкостным манометром  $M$  и с сосудами  $A$  и  $B$ , заполненными водой.

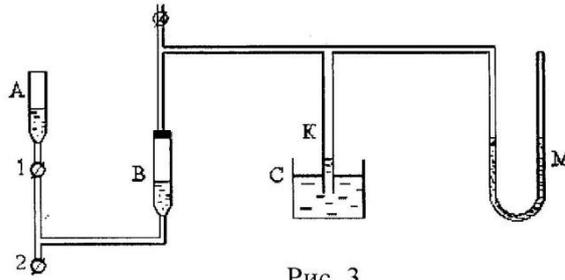


Рис. 3

Сосуды **A** и **B** неподвижны. Давление воздуха в сосуде **B** увеличивается при переходе воды из сосуда **A** в сосуд **B**, когда открыт кран **1**, краны **2** и **3** – закрыты.

### Порядок выполнения работы

**1.** В установке, собранной по схеме, добиться, чтобы столбик жидкости в капилляре не содержал пузырьков (капилляр слегка опущен в сосуд с жидкостью). Уравновесить систему, открыв кран **3** (одинаковое – атмосферное – давление над поверхностью жидкости в сосудах **A** и **B**; вода в коленах манометра находится на одном уровне).

**2.** Закрыть кран **3** (кран **2** закрыт). Изменяя уровень жидкости в сосуде **B** при помощи крана **1**, добиться полного выравнивания уровней жидкости в капилляре **K** и стакане **C**. По разности уровней в манометре производят отсчет высоты столба воды  $h_i$  – избыточное давление.

**3.** Опыт повторить не менее пяти раз.

Примечание: следить, чтобы уровень воды в сосуде **B** не превышал красной черты (см. схему). При заполнении сосуда **B** слить воду из него через кран **2** до зеленой черты, при этом кран **3** обязательно открыт, кран **1** – закрыт.

**4.** Результаты измерений занести в таблицу:

№	$h_i, м$	$\langle \sigma \rangle$	$(\langle h_i \rangle - h_i)$	$(\langle h_i \rangle - h_i)^2$	$\Delta h$	$\varepsilon, \%$	$\Delta \sigma$
1							
2							
3							
4							
5							
$\langle \rangle$	$\langle h_i \rangle =$			$\Sigma (\langle h_i \rangle - h_i)^2 =$			

**5.** Найти среднее значение коэффициента поверхностного натяжения по формуле (4), сравнить его с табличным значением. (Диаметр капилляра  $d = 1,2 \cdot 10^{-3}$  (м).)

**6.** Рассчитать границы доверительного интервала (абсолютную случайную погрешность)

по формуле:  $\Delta h = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\Sigma (\langle h_i \rangle - h_i)^2}{n \cdot (n - 1)}}$ , где  $n$  - количество опытов,  $t_{\alpha, n}$  – коэффициент Стьюдента (для 5 опытов  $t_{\alpha, n} = 2,77$ ).

**7.** Найти относительную погрешность результата:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{\langle h \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g_H}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2}$$

где  $g = 9,81 \left(\frac{м}{с^2}\right)$ ;  $\Delta g = 0,005 \left(\frac{м}{с^2}\right)$ ;  $\rho = 10^3 \left(\frac{кг}{м^3}\right)$ ;

$$\Delta\rho = 0,5\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right); \quad \Delta d = 0,00005(\text{мм}) \quad ; \quad \sigma_{\text{таб}} = 0,073\left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^4}\right)$$

8. Найти абсолютную погрешность результата:  $\Delta\sigma = \langle\sigma\rangle \cdot \varepsilon$ .
9. Записать окончательный результат коэффициента:  $\sigma = \langle\sigma\rangle \pm \Delta\sigma$ .

### Контрольные вопросы

1. Что называется коэффициентом поверхностного натяжения (привести два определения – через силу поверхностного натяжения и работу для расширения; единицу измерения для коэффициента).
2. Напишите формулу для определения давления под искривленной поверхностью жидкости (давление Лапласа).
3. Поясните используемый метод нахождения коэффициента поверхностного натяжения.
4. Почему жидкость в свободном состоянии стремится принять минимальную поверхность?
5. Как изменяется величина коэффициента при изменениях температуры?
6. Рассмотрите распределение смачивающей и несмачивающей жидкости в капилляре.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### «ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ МЕТАЛЛОВ»

**Цель работы:** определить опытным путем коэффициенты линейного расширения латуни и стали, и сравнить их.

#### Теоретические основы работы

Изменение линейных размеров тела при нагревании называется **тепловым линейным расширением**. Линейное расширение различных материалов при одном и том же повышении температуры различно и характеризуется **коэффициентом линейного расширения  $\alpha$** .

Пусть при температуре  $T_0^*$  (начальной) рассматриваемый линейный размер тела (длина трубки) равен  $L_0$  единицам длины, а при температуре  $T$  - соответственно  $L$ . Тогда по определению:

$$\alpha = \frac{L - L_0}{L_0(T - T_0)} \quad \alpha = \frac{1}{L_0} \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (1) \quad \text{Следовательно,}$$

расширения коэффициент линейного численно равен отношению изменению линейных размеров тела при изменении температуры на один Кельвин. Из формулы (1) следует, что  $L = L_0(1 + \alpha \Delta T)$ , где  $\Delta T = T - T_0$  - изменение температуры тела ( $\alpha_{\text{стали}} = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ;  $\alpha_{\text{латуни}} = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ )

Тепловое расширение тел нужно учитывать при конструировании многих сооружений. Тепловое расширение тел учитывается при конструировании всех установок, приборов и машин, работающих в переменных температурных условиях.

## Описание установки

Прибор для определения коэффициента линейного расширения (рис.1) состоит из подставки 1, левой стойки 3 с зажимным винтом 5, правой стойки 2 со втулкой, в которой помещается индикатор ИЧ 6, закрепленный винтом 7.

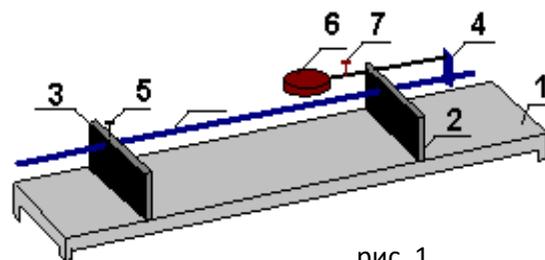


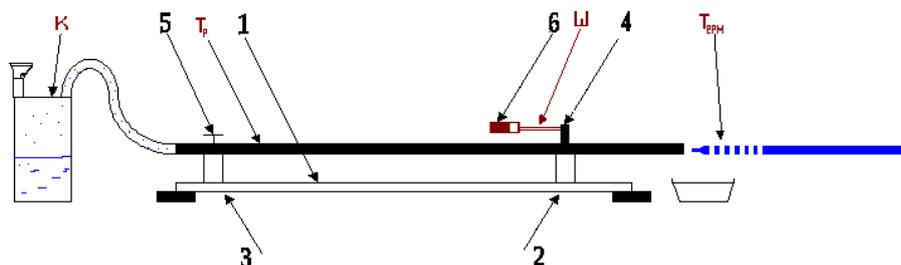
рис. 1

Для эксперимента предлагаются две металлические трубки - стальная и латунная, (длинной по 550мм) с закрепленными неподвижно пластинками 4. Трубки из исследуемого металла пропускают длинным концом через отверстия в стойках 2 и 3 так, чтобы пластинка 4 расположилась вертикально и не доходила до правой стойки 2 на 3-5мм. После этого закрепляют трубку винтом 5 в левой стойке.

Индикатор 6 вставляется в отверстие втулки стойки 2 и закрепляется винтом 7 так, чтобы шток, упирающийся в левую сторону пластинки 4, обеспечивал натяжение механизма индикатора. Натяжение определяется поворотом стрелки индикатора относительно шкалы на 1-2 оборота.

После закрепления индикатора поворотом наружного кольца индикатора в правую сторону или левую сторону установить конец стрелки против деления «нуль» на шкале.

### Схема установки



**К** – колба-парообразователь, **Тр** – трубка из исследуемого металла, **Ш** – шток индикатора, **Терм** - термометр

### Порядок выполнения работы

- Собрать установку и определить исходные данные для опыта:
  - измерить с помощью линейки рабочий участок трубки  $L_0$  от центра винта 5 до левой стороны пластинки 4;
  - измерить термометром температуру  $T_0$  окружающего воздуха.
- Проверить нулевую установку индикатора и только после этого соединить с колбой. Пар, образующийся в колбе при интенсивном кипении воды, пропускается через трубку прибора в течение нескольких минут.
- Определить нагрев трубки  $T_2$ , т.е. температуру пара (= температуре кипения воды) на свободном конце трубки.
- Увеличение длины трубки  $\Delta L$  определить по показаниям индикатора (цена деления шкалы индикатора 0,01 мм).
- Измерение проделать для каждой из стержней. Заполнить таблицу 1.
- По формулам найти:

$$\Delta\alpha = |\alpha - \alpha_1| \text{ и } \varepsilon = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_1} \cdot 100 \%$$

Таблица 1.

	$L_0, \text{ мм}$	$T_0, \text{ К}$	$T, \text{ К}$	$\Delta L, \text{ мм}$	$\alpha_3, \text{ К}^{-1}$	$\Delta\alpha, \text{ К}^{-1}$	$\varepsilon, \%$
<i>сталь</i>							
<i>латунь</i>							

### Контрольные вопросы

1. Как зависят линейные размеры твердого тела от температуры?
2. Что называется коэффициентом линейного расширения?
3. Как связаны коэффициенты линейного и объемного расширений, какова их размерность?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### «ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ КВАДРАТИЧНОЙ СКОРОСТИ МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА МЕТОДОМ ОТКАЧКИ»

**Цель:** измерить среднюю квадратичную скорость молекул воздуха.

#### Теоретические основы работы

В результате многократных соударений скорость каждой молекулы изменяется по модулю и направлению. Однако из-за хаотичности движения молекул все направления движения являются равновероятными, т.е. в любом направлении в среднем движется одинаковое число молекул.

Согласно МКТ, как бы ни изменялись скорости молекул при столкновениях, **средняя квадратичная скорость** молекул массой  $m_0$  в газе, находящемся в состоянии равновесия при  $T = \text{const}$ , остается постоянной и равной

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{3kT/m_0} = \sqrt{3RT/M} \quad (1)$$

где  $R$  - универсальная постоянная ( $R = 8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ ),  $M$  - молярная масса;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  – постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура\* (температура в лаборатории вначале опыта).

Это объясняется тем, что в газе, находящемся в состоянии равновесия, устанавливается некоторое стационарное, не меняющееся со временем распределение молекул по скоростям, которое подчиняется определенному статистическому закону, который теоретически был выведен Дж. Максвеллом.

Кроме средней квадратичной скорости молекулы газа характеризуются наиболее вероятной скоростью

$$v_g = \sqrt{2kT/m_0} = \sqrt{2RT/M}$$

и средней арифметической скоростью

$$\sqrt{8kT/(\pi m_0)} = \sqrt{8RT/(\pi M)}$$

$\langle v \rangle =$

Используя уравнение состояния идеального газа  $pV = \frac{m}{M} \cdot RT$ , **можно** показать, что среднюю квадратичную скорость молекул газа можно определить по соотношению: где  $p$  - давление газа;  $V$  - объем газа;  $m$  - масса газа, которые могут быть измерены с

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3pV}{m}} \quad (2)$$

помощью приборов.

При выполнении работы используется стеклянный шар для взвешивания воздуха. Пусть в начале опыта при атмосферном давлении  $p_1$ , масса воздуха с шаром -  $m_1$ . После откачивания воздуха давление внутри шара станет  $p_2$ , масса оставшегося воздуха с шаром -  $m_2$ .

Тогда масса откачанного воздуха:  $\Delta m = m_1 - m_2$

Для вычисления средней квадратичной скорости молекул воздуха можно воспользоваться формулой:

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3p_2 V_2}{m_2}} \quad (3)$$

где  $p_2$  - давление в шаре после откачки (измеряется с помощью манометра);  $V_2$  - объем газа, оставшегося в шаре после откачки (т.к. газ занимает весь предоставленный ему объем, то  $V_2 = V$ ,  $V = 1,17$  л).

Тогда из соотношения (3) получим:

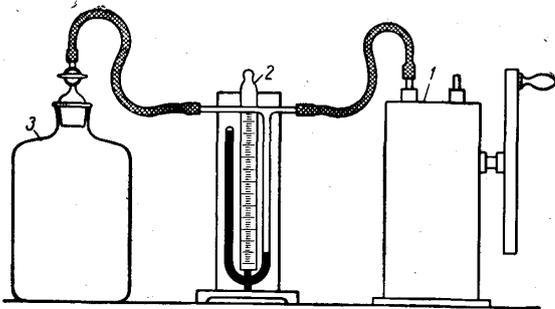
Пользуясь этой формулой,  $\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3p_2 V}{m_2}}$  рассчитаем среднюю квадратичную скорость по формуле

где  $p_1$  - атмосферное давление,  $\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3p_1 V_1'}{\Delta m}}$  измеренное по баром (4)  $V_1'$  - объем откаченного воздуха;  $\Delta m$  — масса откаченного воздуха.

Используя уравнение Клапейрона-Менделеева можно получить соотношение для определения экспериментального значения средней квадратичной скорости:

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3(p_1 - p_2)V}{\Delta m}} \quad (5)$$

Схема установки



- 1 - насос Комовского,
- 2 - манометр,
- 3 - стеклянный баллон

### Порядок выполнения работы

#### Задание 1. Определить теоретическое значение средней квадратичной скорости молекул воздуха

Рассчитать теоретическое значение скорости по формуле:

где  $M = 29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $T$  - абсолютная температура в лаборатории (в начале опыта).

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

#### Задание 2. Экспериментально определить среднюю квадратичную скорость молекул воздуха

1. Открыть шар, чтобы давление находящегося в нем воздуха было равно атмосферному давлению. Определить давление воздуха  $p_1$  по показаниям барометра в лаборатории и выразить его в системе СИ (1 мм.рт.ст. = 133,3 Па).
2. Определить с помощью лабораторных весов массу  $m_1$  шара, заполненного воздухом.
3. Откачать из шара воздух с помощью насоса Комовского так, чтобы давление  $p_2$  стало 0,2 атмосферного (следить по манометру). Перекрыть с помощью зажима доступ воздуха в шар.
4. Определить массу шара  $m_2$  после откачивания воздуха.

Примечание. От точности и осторожности взвешивания зависит результат опыта.

5. Вычислить массу откаченного воздуха:  $\Delta m = m_1 - m_2$
6. Вычислить экспериментальное значение средней квадратичной скорости молекул воздуха, используя формулу (5).
7. Сравнить экспериментальное значение средней квадратичной скорости с теоретическим значением и оценить абсолютную и относительную погрешности по формулам:

$$\Delta \langle v_{кв} \rangle = \langle v_{кв} \rangle_{т} - \langle v_{кв} \rangle_{э}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta \langle v_{кв} \rangle}{\langle v_{кв} \rangle_{т}} \cdot 100 \%$$

8. Данные занести в Таблицу 1.

Таблица 1.

$p_1$	$p_2$	$m_1$	$m_2$	$\Delta m$	$\langle v_{кв} \rangle_T$	$\langle v_{кв} \rangle_{\varepsilon}$	$\Delta \langle v_{кв} \rangle$	$\varepsilon$

### Контрольные вопросы

1. Назовите уравнение состояния идеального газа.
2. Записать формулу средней квадратичной скорости.
3. Одинаковы ли средние квадратичные скорости молекул различных газов, находящихся в одном сосуде?
4. Одинаковы ли средние квадратичные скорости молекул различных газов, находящихся при постоянной температуре?
5. Записать формулы наиболее вероятной скорости и средней арифметической теплового движения молекул? Как они зависят от температуры?

## ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ»

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

#### «ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ»

Цель работы: ознакомление с электроизмерительными приборами различных систем и другим вспомогательным оборудованием.

#### *Введение*

#### ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ.

Определение электрических величин в цепях тока осуществляется при помощи электроизмерительных приборов, которые делятся на вольтметры, амперметры и т.п. Существуют приборы для измерения постоянного, переменного и обоих родов тока. Каждый прибор характеризуется точностью, чувствительностью и ценой деления.

*Точность приборов* – главная из характеристик. Государственным стандартом принято деление по степени точности на 7 классов.

*Класс точности* обозначается в кружке или без кружка: 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.5 и т.д. По классу точности можно найти значения абсолютной и относительной ошибок измерения.

*Относительная ошибка* определяется произведением класса точности на предельное значение величины, показываемой прибором, деленное на показание прибора. Если амперметр с пределом измерения в 10 А и классом точности 1.5 показывает величину тока 8 А, то относительная ошибка данного измерения

$$\varepsilon = \frac{1.5 \cdot 10}{8} = 1.9\%$$

*Чувствительностью* называют отношение величины перемещения или угла поворота стрелки прибора  $d\beta$  к величине  $dx$ , вызвавшей этот поворот

$$S'' = \frac{d\beta}{dx}$$

Величина  $C = \frac{1}{S}$ , обратная чувствительности, называется *ценой деления* прибора. Она определяется отношением значения электрической величины, вызывающей отклонение стрелки прибора на 1 деление шкалы.

Помимо делений, на шкале прибора помещаются следующие условные обозначения:

- а) символ измеряемой величины: А, V,  $\mu$ А, mА.
- б) класс точности прибора: 0.5.
- в) обозначение рода тока: переменный  $\sim$ , постоянный  $-$ , постоянный и переменный  $\simeq$ .
- г) знак рабочего положения прибора: горизонтальное  $\square$  (или  $\rightarrow$ ), вертикальное  $\perp$  (или  $\uparrow$ ), наклонное  $\angle$ .

д) система прибора: магнитоэлектрическая - , электромагнитная - . С целью защиты приборов от действия магнитных полей, измерительный механизм помещается в магнитный экран – стальную коробку. У таких приборов знак качества системы на плате ставится в кружок или прямоугольник  $\boxed{Д}$ .

е) экранирование не полностью предохраняет механизм прибора от внешних магнитных полей, поэтому на приборе римской цифрой в квадрате указывается категория прибора, которая дает в процентах дополнительную погрешность измерения, вызванную действием внешних полей. По ГОСТу установлено деление приборов на 4 категории:

$\boxed{I}$        $\boxed{II}$        $\boxed{III}$        $\boxed{IV}$

з) изоляция выдерживает напряжение: 2 кВ,  2      

К электроизмерительным приборам предъявляют следующие требования:

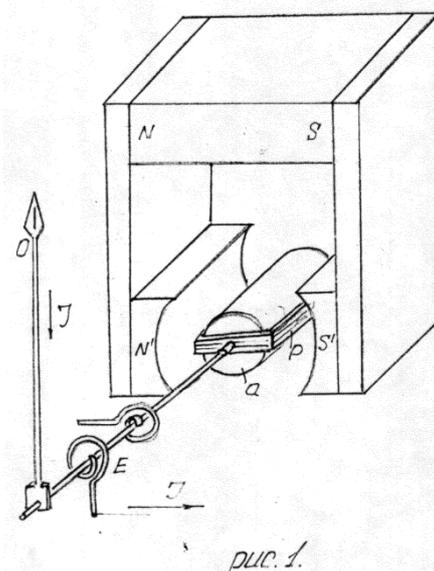
1. Приборы должны потреблять малую мощность, т.е. не вызывать заметных изменений измерительных величин.
2. Их стрелка должна быстро успокаиваться.
3. Они должны быть надежными в работе и простыми в обращении.

Наиболее часто применяются приборы магнитоэлектрической, электромагнитной и электродинамической систем.

### ПРИБОРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.

Приборы магнитоэлектрической системы являются наиболее чувствительными приборами постоянного тока. В них используется действие постоянного магнитного поля на проводники с током (рис. 1).

Подвижная часть механизма состоит из рамки  $P$ , на которой помещается обмотка из тонкой медной изолированной проволоки. Обмотка рассчитывается на небольшие токи 4 – 15 мА. К постоянному неподвижному магниту  $NS$  присоединены полюсные наконечники из мягкого железа  $N'S'$ . Рамка надета на неподвижный стальной цилиндр «а» и может вращаться в зазоре между цилиндром и полюсными наконечниками магнита. Концы обмотки рамки соединяются со спиральными пружинами  $E$ , через которые и подводится ток в рамку. Вращающую систему рамка укреплена на двух полюсах и к ней прикреплена стрелка. В промежутке между магнитными наконечниками и стальным цилиндром создается сильное, довольно равномерное и радиально направленное магнитное поле. При прохождении тока под действием магнитного поля рамка испытывает вращающий момент. Величина этого вращающего момента зависит от площади рамки  $S$ , числа витков  $\omega$ , величины магнитной индукции  $B$  и тока  $I$ :  $M_{вр} = BS I \omega$ .



Шкала у прибора равномерная. Вращение рамки вызывает закручивание пружин, в которых возникает противодействующий момент упругих сил, пропорциональный углу закручивания. При равенстве этих двух моментов стрелка прибора останавливается. Вращение рамки в магнитном поле вызывает появление в ней индукционных токов, магнитное поле по закону Ленца направлено так, что взаимодействуя с магнитным полем постоянного магнита, тормозит вращение рамки, гасит ее колебания и стрелка быстро устанавливается на определенном делении шкалы. Следовательно, индукционный ток в рамке является гасителем колебаний подвижной части прибора.

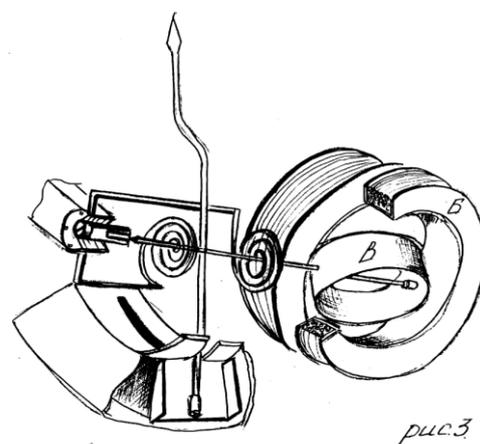
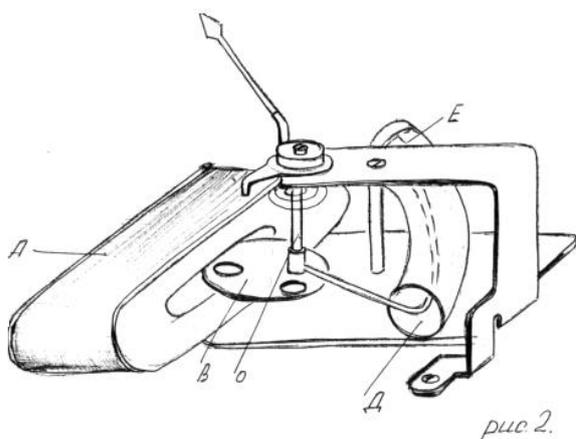
Устройство электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы определяет следующие их качества:

1. В зазоре, где вращается рамка с током, имеется сильное магнитное поле, поэтому на приборы этой системы слабо действуют внешние магнитные поля и у большинства из них нет магнитных экранов.
2. Они мало поглощают энергии.

### ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ.

В приборах электромагнитной системы используется магнитное действие тока. Магнитное поле создается током, проходящим по обмотке катушки  $A$ , внутрь которой втягивается пластинка  $B$  из ферромагнетика, насаженная эксцентрически на ось  $O$ , связанную со стрелкой прибора (рис. 2).

К оси одним концом припаяна пружина. При втягивании пластины внутрь катушки ось поворачивается, пружина закручивается и создает противодействующий упругий момент. При равенстве момента, создаваемого магнитным полем, и противодействующего момента упругих сил стрелка останавливается. Колебания стрелки гасятся воздушным тормозом. Пластина Е, перемещаясь внутри изогнутого и замкнутого цилиндра Д, сжимает воздух в цилиндре, обеспечивая этим плавный поворот стрелки прибора (см. плакат). Благодаря большому поперечному сечению внутри катушки создается слабое магнитное поле, поэтому прибор чувствителен к действию внешнего магнитного поля. Для защиты от внешнего магнитного поля используется астатическое устройство его механизма. В астатическом приборе имеются две плоские катушки, направление обмоток в которых, противоположны друг другу. На ось эксцентрически посажены две пластины из мягкого железа так, чтобы при пропускании тока они одновременно втягиваются внутрь катушек. При такой конструкции внешнее магнитное поле совпадает с направлением магнитного поля в одной катушке и направлено против магнитного поля другой катушки (в одной катушке внешнее магнитное поле усиливает магнитное поле тока, в другой – в такой же степени его ослабляет). В результате внешнее магнитное поле не оказывает влияния на показания приборов. Ток в обмотку катушки поступает не через пружины, а непосредственно из цепи. Вращающий момент магнитного поля тока, поворачивающего пластину, пропорционален квадрату тока, проходящего через прибор. Эти приборы годны как для постоянного тока, так и для переменного. В приборах на несколько пределов измерения обмотка катушки делится на несколько секций. Последовательное и параллельное соединение изменит омическое сопротивление прибора и тем самым величину допустимого тока в нем. Простота конструкции прибора и пригодность прибора этой системы для измерения постоянного и переменного тока дает возможность шире использовать их как в лабораторных работах, так и в технике. Лабораторные переносные астатические приборы достигают класса точности 0.5.



### ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.

Действие приборов этой системы основано на взаимодействии проводников с током. Они состоят из 2 катушек (рис. 3): большой, неподвижной Б и малоподвижной катушки.

Подвижная катушка закреплена на оси, к которой прикреплены 2 пружины и стрелка с крылом воздушного успокоителя У. Ток в подвижную катушку подводится через пружинки, поэтому через прибор нельзя пропускать сильные токи. Неподвижная катушка, как правило, состоит из 2 катушек, обмотки которых соединяются последовательно. При отсутствии тока в приборе плоскость подвижной катушки находится под довольно большим углом к плоскости неподвижной катушки, стрелка прибора стоит на нулевом делении шкалы. При прохождении тока в катушках возникает вращающий момент  $M_{вр}$ , пропорциональный произведению токов  $I_1 I_2$  в катушках на косинус угла сдвига фаз  $\phi$  между

$I_1$  и  $I_2$ .  $M_{вр} \sim I_1 I_2 \cos \phi$ . Поворот катушки создает противодействующий момент упругих сил закручивания в пружинах. Равенство этих моментов определяет положение стрелки на шкале прибора. Для избежания влияния внешних магнитных полей приборы высоких классов точности имеют астатическое устройство. При одновременном изменении направления тока в катушках вращающий момент остается неизменным, поэтому приборы данной системы пригодны для измерений в цепях постоянного и переменного токов. Электродинамические приборы являются наиболее точными приборами переменного тока (класс точности 0,2, 0,5). В амперметрах электродинамической системы для токов 0,5 А неподвижная и подвижная катушки соединяются последовательно. Для больших токов применяется параллельное включение катушек. Вольтметры этой системы имеют неподвижную катушку с большим числом витков из тонкой проволоки. Кроме того, в приборе применяется еще добавочное сопротивление. Подвижная и неподвижная катушки и добавочное сопротивление включены последовательно. Конструкция его напоминает магнитоэлектрические измерительные механизмы, только здесь постоянный магнит заменен электромагнитом. Неподвижные катушки  $A$  надеты на магнитопровод, состоящий из тонких листов трансформаторной стали. Подвижная катушка насажена на ось, к которой прикреплены стрелка и пружинки. Неподвижные катушки создают магнитное поле между полюсами электромагнита. Взаимодействие этого магнитного поля на подвижную катушку с током вызывает поворот катушки на определенный угол, величина которого зависит от величины токов, проходящих в катушках. Ферродинамические приборы имеют внутри сильное магнитное поле, поэтому не нуждаются в магнитной защите. Чувствительность их выше обыкновенных электродинамических приборов.

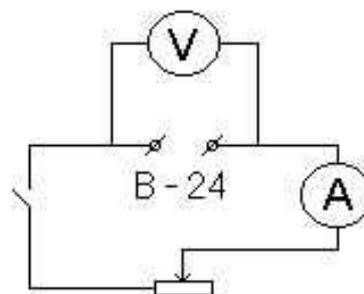
#### Экспериментальная часть

1. Изучите электроизмерительные приборы, используемые в работе, и запишите их паспортные данные.
2. Определите пределы измерения и цену деления амперметра и вольтметра. Для определения цены деления нужно выбранный с помощью переключателя предел измерения прибора  $\alpha_m$  разделить на число делений шкалы прибора  $N_0$ . Каждому пределу измерений соответствует своя цена деления.

Для определения измеряемой величины  $\alpha$  нужно отсчет  $N$ , взятый по шкале прибора, умножить на цену деления. Таким образом,

$$\alpha = N \frac{\alpha_m}{N_0}.$$

3. Собрать схему по рисунку.



4. Изменяя напряжение на выпрямителе, снять показания амперметра и вольтметра.
5. Данные занести в таблицу:

I, mA				
$\varepsilon$ , %				
U, В				
$\varepsilon$ , %				

6. Определить относительную погрешность измеряемых величин по формулам:

$$\varepsilon = \frac{\gamma I_{np}}{I},$$

где –  $\gamma$  – класс точности прибора,  $I_{np}$  – предельное значение силы тока,  $I$  – показания амперметра.

$$\varepsilon = \frac{\gamma U_{np}}{U},$$

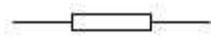
где –  $\gamma$  – класс точности прибора,  $U_{np}$  – предельное значение напряжения,  $U$  – показания вольтметра.

7. Сделать вывод о зависимости  $\varepsilon$  от величины измеряемых силы тока и напряжения и сравнить.

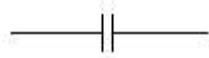
Контрольные вопросы.

1. Как рассчитать по классу точности прибора относительную ошибку измерения?
2. Как определить цену деления шкалы прибора на несколько пределов измерений?
3. Для чего служит и как действует корректор?
4. Какие условные обозначения наносятся на плате электроизмерительного прибора?
5. На каком принципе основано действие электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы?
6. Почему приборы магнитоэлектрической системы имеют равномерную шкалу?
7. На чем основано действие электроизмерительных приборов электромагнитной системы?

**Условные обозначения (современные стандартные обозначения на схемах)**



- резистор (постоянный)



- конденсатор постоянной емкости



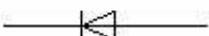
- катушка индуктивности



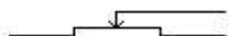
- катушка индуктивности с сердечником



- трансформатор



- полупроводниковый диод



- реостат



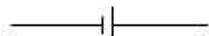
- однополюсный ключ



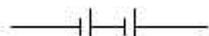
- двухполюсный ключ



- электровакуумный диод



- химический источник ЭДС (элемент)



- батарея элементов



- соединительный проводник



- провода, электрически соединенные (точка - место соединения)



- провода, электрически изолированные

- вольтметр



## ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ «ОПТИКА»

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ ЛИНЗ»

**Цель работы:** научиться центрировать оптическую систему, определять фокусы собирающих и рассеивающих линз.

#### Введение

Для тонких линз справедливо известное соотношение:

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

где  $a$  - расстояние от линзы до предмета,  $b$  - расстояние от линзы до изображения,  $f$  - фокусное расстояние линзы.

Расстояния, отложенные от линзы вдоль распространения светового луча, считаются *положительными*, а отрезки противоположного направления – *отрицательными*.

Собирают установку (см. рис. 1).

Осветитель 2 (лампа накаливания 220 В) включается в сеть. Предметом,

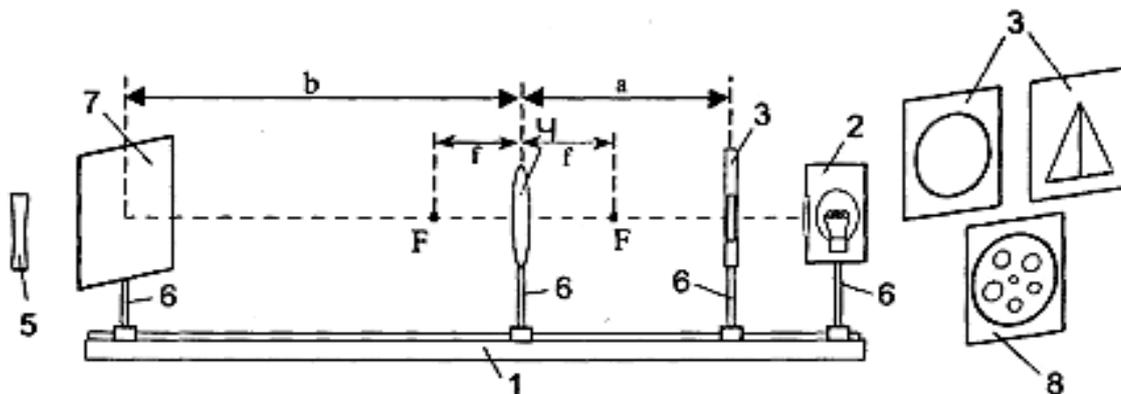


Рис. 1

изображение которого получается при помощи линзы, служит матовая пластинка 3 с рисунком треугольника. Рейтеры 6 имеют крепежные винты, позволяющие перемещать объект в продольном и вертикальном направлениях. Принято головки винтов всегда располагать к экспериментатору. Имеются рейтеры с поперечными салазками, которые позволяют перемещать объект в поперечном направлении - все это необходимо для центрирования системы.

#### Выполнение работы

##### Задание 1. Определение фокусного расстояния тонкой положительной линзы.

Фокусное расстояние линзы определяют путем измерения " $a$ " и " $b$ " и использования формулы (1). Затруднение в этом случае вызывает знак "-", который может превратиться в "+" (см. плакат "Правило знаков").

Таблица 1.

$N$	$a$	$b$	$f$	$\langle f \rangle$
1.				
2.				
3.				

#### Вычисления:

Данные получить для 2-х увеличенных изображений и для 1-го уменьшенного изображения.

Этот метод не достаточно точен, кроме того, он не применим для толстых линз и для системы линз. Существует метод Аббе, который свободен от этих недостатков.

**Задание 2. Определение фокусного расстояния рассеивающей (отрицательной) линзы.**

Оптическая сила  $D$  системы линз, состоящей из собирающей и рассеивающей линз, определяется по формуле

$$D = D_1 + D_2,$$

где  $D_1$  – оптическая сила собирающей линзы,  $D_2$  - оптическая сила рассеивающей линзы.

Для определения оптической силы рассеивающей линзы  $D_2$  необходимо знать оптическую силу системы линз и оптическую силу собирающей линзы  $D_1$ :

$$D_2 = D - D_1$$

$$\text{Фокусное расстояние рассеивающей линзы } f_2 = \frac{1}{D_2}$$

Возьмите собирающую линзу (см. рис.2), получите изображение предмета, после чего между экраном и собирающей линзой поставьте рассеивающую линзу.

Изображение пропадет; после этого, отодвинув экран, получите на нем четкое изображение (см. схему рис.2).

В этом случае изображение на экране  $\mathcal{E}_1$  можно принять за мнимый предмет, тогда его изображение на экране  $\mathcal{E}_2$  будет действительным.

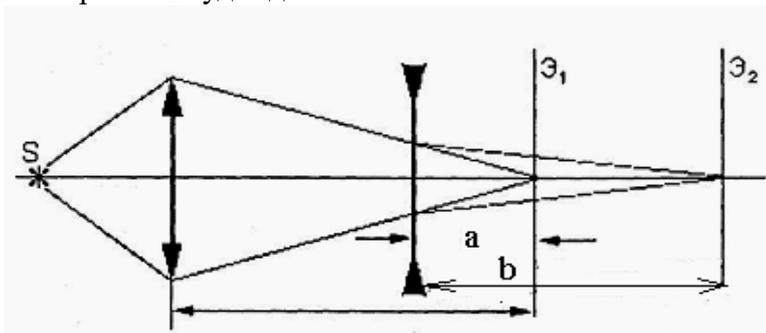


Рис. 2

Из формулы  $-\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = -\frac{1}{f}$  можно выразить  $\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$  и найти  $f = \frac{a \cdot b}{a - b}$ .

Следует помнить, что опыт получается лишь в случае, если  $D_1 > D_2$ .  
Данные занести в таблицу 2.

Таблица 2.

№	$a$	$b$	$f$	$\langle f \rangle$
1				
2				
3				

**Вычисления**

*Контрольные вопросы*

1. Что такое линза? Дать определения различных видов линз.
2. Что такое фокус линзы, фокусное расстояние линзы, оптическая сила линзы?
3. Чему равна оптическая сила линзы?
4. Что такое угловое и линейное увеличение линзы?
5. Знать построение изображений в собирающей и рассеивающей линзах.
6. Может ли двояковыпуклая линза быть рассеивающей?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### «ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСКОПА»

**Цель работы:** научиться работать с микроскопом, определить увеличение микроскопа, измерить размеры объектов.

#### Введение

Микроскоп представляет собой оптическую систему, позволяющую получить мнимое увеличенное изображение предмета, расположенного сравнительно близко от первой линзы системы. В большинстве случаев микроскоп используется в сочетании с глазом; при совместном действии этих оптических систем на сетчатке глаза создается действительное изображение предмета, сильно увеличенное по сравнению с изображением, создаваемым невооруженным глазом. Отношение упомянутых изображений определяет субъективное увеличение микроскопа. Для разных наблюдателей ввиду различия оптической силы глаз это увеличение может быть несколько различным. Используя усредненное (для разных глаз) значение расстояния наилучшего зрения, можно выразить угловое увеличение микроскопа через его оптические параметры:

$$\beta = \frac{D\Delta}{f_{об} f_{ок}},$$

где  $D$  — расстояние наилучшего зрения ( $D=25$  см для нормального глаза),  $\Delta$  — расстояние между фокусами объектива и окуляра,  $f_{об}$  и  $f_{ок}$  — фокусные расстояния объектива и окуляра.

Важнейшей характеристикой микроскопа является его разрешающая способность, т. е. способность разделять две точки предмета. Разрешающая способность микроскопа, как и всякого оптического прибора, ограничена в силу конечных размеров длины световой волны.

Микроскоп — оптический прибор, позволяющий различать мелкие детали. Устройство микроскопа простейшего типа состоит из 2-х основных частей: механической и оптической. Механическая часть состоит из штатива 1, тубуса 2, предметного столика 3, микрометрического винта 4. Оптическая часть осветительного аппарата состоит из зеркала 8, конденсора 5, сменных объективов окуляра 7. (см. рис.1)

Ход лучей в микроскопе показан на рис. 2, где  $\Pi$  — предмет,  $\Pi'$  — действительное изображение предмета,  $\Pi''$  — мнимое изображение предмета,  $f_{об}$  и  $f_{ок}$  — фокусные расстояния объектива и окуляра,  $b$  — объектив,  $7$  — окуляр,  $l$  — высота предмета,  $l'$  — высота

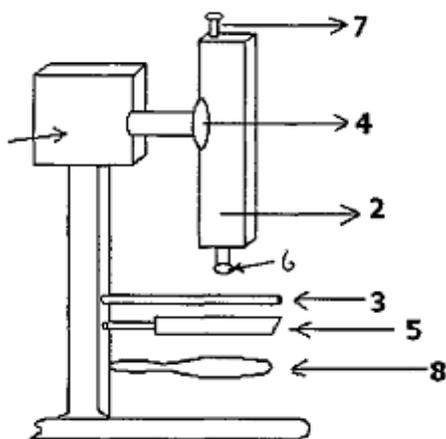


Рис. 1 изображение

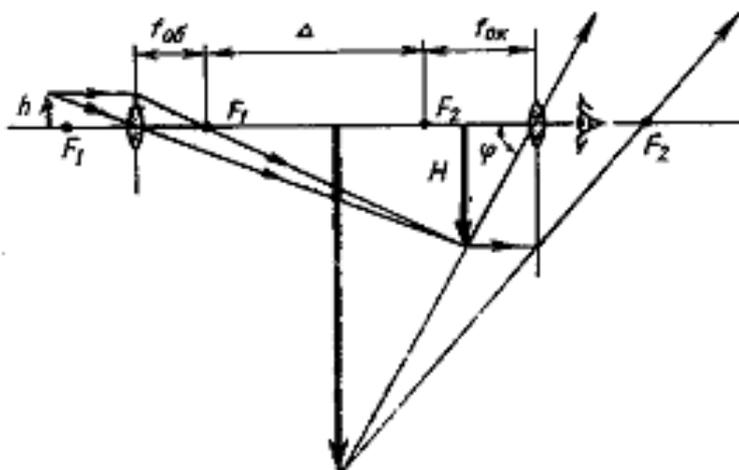


Рис. 2

предмета,  $l''$  - высота мнимого изображения предмета,  $\Delta$  - расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра.

Предмет помещают между  $2f_{об}$  и  $f_{об}$ . Изображение в этом случае получается за  $2f$ , но перед  $f_{ок}$  (окуляр работает как лупа).

Увеличение микроскопа можно рассматривать как произведение увеличения окуляра и объектива:  $\beta = \beta_{об}^x \cdot \beta_{ок}^x$ , где  $\beta$  - линейное увеличение микроскопа ( $\beta = \frac{l''}{l}$ ),  $\beta_{об}^x$

- линейное увеличение объектива ( $\beta_{об}^x = \frac{l'}{l}$ ),  $\beta_{ок}^x$  - линейное увеличение окуляра ( $\beta_{ок}^x = \frac{l''}{l'}$ ).

$$\beta_{ок} = \frac{l''}{l'}$$

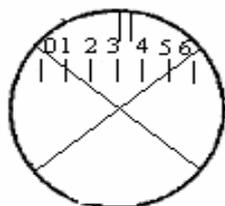
Выполнение работы

**Задание 1. Ознакомиться с устройством микроскопа (см. рис. 1), рассмотреть ход лучей в микроскопе (см. рис. 2)**

**Задание 2. Определение увеличения объектива микроскопа.**

1. Ознакомьтесь с устройством окулярного микрометра и объект - микрометра (см. рис. 1).
2. Проведите измерения увеличения объектива микроскопа, используя окулярный микрометр. На столик положите объект - микрометр. Запишите цену деления объект - микрометра. Рассмотрите штрихи объект - микрометра и положение «перекрестье» окулярного микрометра (см. рис.3)

Наведите «перекрестье» или двойную риску на какой-либо штрих-объект микрометра (допустим положение А), запишите значение на барабане (3), пусть будет - измерение 1.



Наведите «перекрестье» или двойную риску на какой-либо штрих-объект микрометра (допустим положение А), запишите значение на барабане (3), пусть будет - измерение 1.

Подсчитайте количество делений  $z$  объекта - микрометра.

$\alpha$  - цена деления объект - микрометра.  $II-1$  - разность двух отсчетов по шкалам окулярного микрометра, поворот барабана (3) на одно деление соответствует 0,1 мм, определите  $\beta$  - линейное увеличение объектива. При подсчете все размеры приведите к

одним наименованиям 
$$\beta = \frac{II-1}{\alpha \cdot z}$$

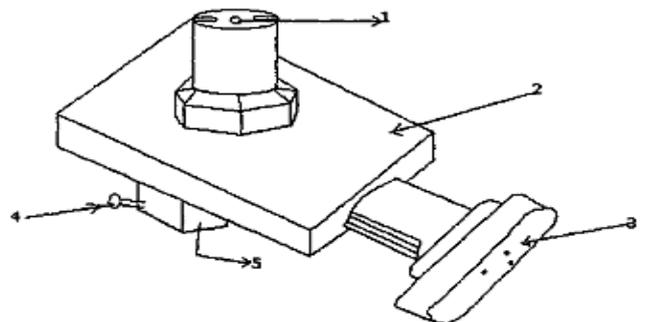


Рис. 4

**Задание 3. Измерение величины объекта.**

Снимите со столика объект - микрометр, положите на столик предмет (волос, нитку, проволоку и прочее).

Получите четкое изображение объекта в микроскопе. Установите перекрестье на левую границу объекта, переместите перекрестье на правую границу объекта. Запишите

показания на барабане (3). По формуле  $\ell = \frac{\Pi - 1}{\beta}$  найдите величину самого объекта, где  $\ell$  - величина объекта,  $\Pi - 1$  – разность отсчетов по барабану (3),  $\beta$  - линейное увеличение объектива (из задания 2).

#### Контрольные вопросы

1. Назовите основные части микроскопа.
2. Рассмотрите ход лучей в микроскопе.
3. Чему равно увеличение микроскопа?
4. Что называется разрешающей способностью оптических приборов?

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

#### «ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ С ПОМОЩЬЮ БИПРИЗМЫ ФРЕНЕЛЯ»

**Цель работы:** углубить представления о волновой природе света, на практике освоить получение интерференции по методу деления фронта волны (бипризма Френеля), научиться измерять параметры интерференции.

#### Введение

В данной работе рассматривается получение когерентных источников методом деления фронта волны, а также получение интерференции от бипризмы Френеля.

Волны и источники этих волн когерентны, если колебания в них происходят с постоянной разностью фаз:  $\Delta\varphi = \text{const}$ ,  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ ;  $\varphi_1, \varphi_2$  - фазы колебаний в первой и второй волне соответственно.

Условия экстремумов колебаний выражаются через соотношения фаз или через разность хода лучей

$$\Delta l: \Delta\varphi = \pm 2k\pi, \quad \Delta l = \pm 2k \lambda / 2 = \pm k \lambda, \quad \text{для максимумов.}$$

$$\Delta\varphi = \pm (2k+1)\pi, \quad \Delta l = \pm (2k+1) \cdot \lambda / 2, \quad \text{для минимумов.}$$

$$\Delta l = n_2 \cdot l_2 - n_1 \cdot l_1, \quad n_1 = n_2 = 1, \text{ тогда } \Delta l = l_2 - l_1 \text{ оптическая разность хода,}$$

где  $k$  - порядок интерференции,  $k = 0, 1, 2, 3$ ;  $n$  - показатель преломления среды.

Картина интерференции для белого цвета представляет собой набор разноцветных одинаковых по величине полос чередующихся с тёмными полосами. Для монохроматического цвета - это набор из полос определённого цвета и тёмных полос.

Картина интерференции дана на рис. 1 где  $\Delta x$  - ширина интерференционной полосы.

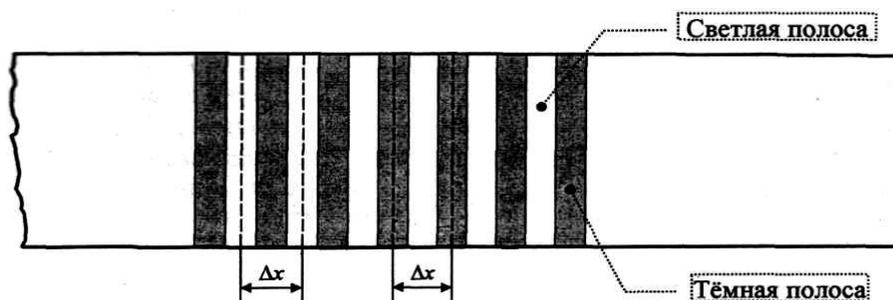


Рис. 1

$$\Delta x = \frac{L}{d} \cdot \lambda,$$

где  $\Delta x$ —ширина интерференционной полосы,  $L$  - расстояние от когерентных источников до экрана,  $d$  - расстояние между когерентными источниками,  $\lambda$  - длина волны.

По мере удаления от центра поля интерференции максимумы смещаются относительно друг друга. Одним из условий возникновения интерференционной картины является ограниченная пространственная протяжённость когерентных источников. Это условие образует понятие пространственной когерентности источников. Качество интерференционной картины тем выше, чем выше пространственная когерентность источников, т.е. чем меньше их толщина “b”.

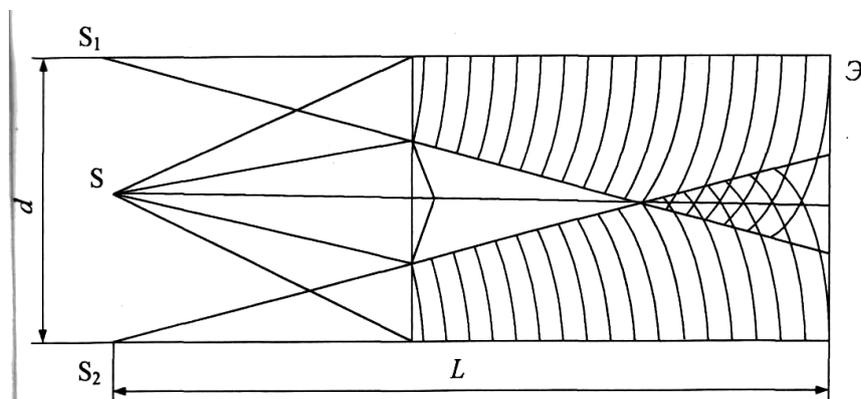


Рис.

Два независимых источника света не могут быть когерентными, поэтому для получения интерференции применяют один источник, излучение которого делят на две части, а затем налагают их друг на друга.

В данной работе мы рассмотрим метод деления фронта волны от бипризмы Френеля (см. рис. 2), где Э - экран,  $S_1, S_2$  - мнимые источники,  $d$  - расстояние между источниками.

#### Выполнение работы

#### Задание 1. Определение длины волны с помощью бипризмы Френеля.

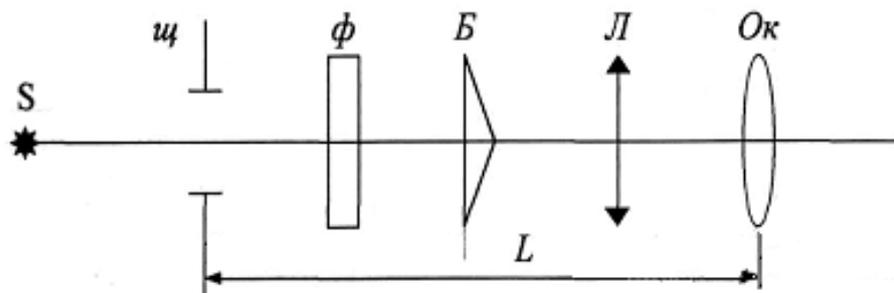


Рис. 3

1. Соберите схему установки по рис. 3 для наблюдения интерференции, где  $S$  - источник,  $\omega$  - щель,  $B$  - бипризма,  $L$  - линза,  $Ож$  - окулярный микрометр,  $\phi$  - фильтр.

2. Уберите линзу, фильтр и установите бипризму Френеля на расстоянии  $a=20$  см от щели.

3. Проверьте с помощью листа белой бумаги, что бы световой поток падал от осветителя последовательно на щель, бипризму. От бипризмы на бумаге получите, светлую полосу, и направьте её в объектив микроскопа.

4. Сужайте щель. Наблюдайте интерференционную картину (радужные полосы) в микроскоп.

5. Поставьте фильтр. Измерьте  $\Delta x$  по шкале *ок*. Из  $\Delta as_1o$  и  $\Delta oa's'_2$   
 $\Rightarrow \frac{d}{h} = \frac{l}{k} \Rightarrow d = \frac{l \cdot h}{k}$

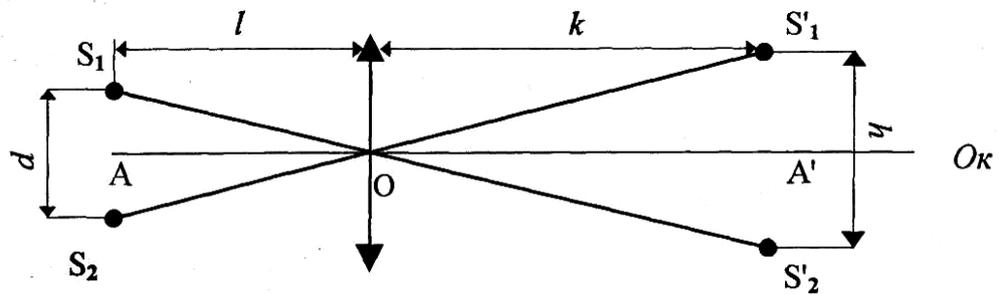


Рис. 4

Ход лучей в линзе дан на рис.4, где  $S_1, S_2$  - мнимые источники,  $d$  - расстояние между источниками,  $S'_1, S'_2$  - изображение источников,  $h$  - высота изображения в *Ok*,  $l$  - расстояние от щели до *L*,  $k$  - расстояние от *L* до *Ok*.

6. Поставьте линзу между *B* и *Ok*.
7. Отодвигая микроскоп, следите за тем, как интерференционная картина превращается в две светящиеся полосы (это мнимые источники  $S'_1, S'_2$  света). С помощью микроскопа измерьте расстояние между их центрами. Это  $h$ .
8. Измерьте  $l, k, h$ .

9. Подсчитайте  $\lambda = \frac{d}{L} \cdot \Delta x$

10. Заполните таблицу:  $L$

$N$	$L$	$\Delta x$	$l$	$k$	$h$	$d$	$\lambda$
1							
2							
3							

### Контрольные вопросы

1. Какие волны называются когерентными?
2. Назовите методы создания когерентных источников?
3. В чем состоит явление интерференции света?
4. При каких условиях в данной точке волнового поля возникает интерференционные максимумы и минимумы?
5. Объяснить явление интерференции от бипризмы Френеля; рассмотреть ход лучей.
6. Какие линии называют линиями равного наклона?
7. Выведите формулы для определения длины волны.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

#### «НАБЛЮДЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ МЕТОДОМ КОЛЕЦ НЬЮТОНА»

**Цель работы:** наблюдение интерференции линий равной толщины, определение радиуса кривизны линзы.

#### Введение

Наложив плоско выпуклую линзу на стеклянную пластину можно наблюдать интерференционную картину. Интерференция образуется за счет наличия воздушного клина (см. рис.1).

Схема образования колец Ньютона в отраженном свете - падающий луч. 2 - пластина. 3 - плоско - выпуклая линза. R - радиус кривизны,  $r$  - радиус кольца Ньютона.  $1'$ ,  $1''$  - интерференционные лучи.  $d$  - толщина воздушного зазора. АВР - воздушный клин. Между лучами  $1'$  и  $1''$  образуется оптическая разность хода

$$\Delta = (AB + BC)n \pm \frac{\lambda}{2},$$

где  $n$  - показатель преломления воздушного клина,  $\frac{\lambda}{2}$  - появляется вследствие потери полуволны при отражении луча  $1''$  в точке В (от оптически более плотной среды). На практике воздушный клин очень малый  $r \ll R \Rightarrow AB = BC = d$  тогда

$$\Delta = 2dn - \frac{\lambda}{2} \text{ из } \triangle AMO' \text{ и } \triangle APO' \text{ следует } \frac{d}{r} = \frac{r}{2R - d},$$

учитывая  $r \ll R$ , упростим  $d = \frac{r^2}{2R}$  для разности хода  $\Delta = \frac{r^2 n}{R} - \frac{\lambda}{2}$  (1)

При интерференции условие минимума  $\Delta = \pm k\lambda$  (2); условие максимума

$$\Delta = \pm(2k + 1)\frac{\lambda}{2} \text{ (3). Подставляя (1) в (2) } \frac{r^2 n}{R} - \frac{\lambda}{2} = \pm k\lambda; r_k = \sqrt{\frac{(2k + 1)\lambda R}{2n}} \text{ (4), где } k -$$

порядковый номер светлого кольца, считая от центра  $O'$ . Между светлыми кольцами располагаются темные кольца. Подставим (1) в (3) получим радиусы темных колец,

которые определяются по формуле  $r_k = \sqrt{\frac{k\lambda R}{n}}$  (5). Соотношения (4) и (5) – радиусы

светлых и темных колец для отраженного света. В случае проходящего света соотношения (4) и (5) лишь меняются местами, т.е. соотношения для минимума определяются формулой (4), для максимума формулой (5).

Выполнение работы:

### Задание 1. Определение радиуса кривизны линзы - R.

1. Получите кольца, регулируя толщину воздушного зазора тремя винтами, добейтесь, чтобы они представляли собой окружности, центр которых совпадает с центром линзы.
2. Установите на микроскопе увеличение, равное «1». Изменяя угол наклона линз, добейтесь четкого изображения колец в окуляре микроскопа.
3. Установите на микроскопе увеличение равное «4». Затем, изменяя положение штатива с линзами, добейтесь четкого изображения в увеличенном виде.
4. Повторите те же операции при увеличении равном «7».
5. Установите кольца, за ними установите черный экран для улучшения видимости, рассмотрите кольца в белом свете.
6. Введите светофильтр перед осветителем, проведите измерения диаметров  $d$  трех темных колец, наблюдаемых в микроскоп. Результаты занесите в таблицу.
7. Диаметры полученных колец разделить на конечное увеличение микроскопа, найти натуральные диаметры колец  $d_{\text{нат}}$ , Результаты занесите в таблицу 1.
8. Используя различные сочетания из трех значений радиусов колец по два, вычислите

$$R = \frac{r_k^2 - r_l^2}{(k - l)\lambda} \text{ (в нашем случае будет три значения) или } R = \frac{(r_k - r_l)(r_k + r_l)}{(k - l)\lambda},$$

найдите  $R_{\text{ср}}$ , результаты занесите в таблицу 1.

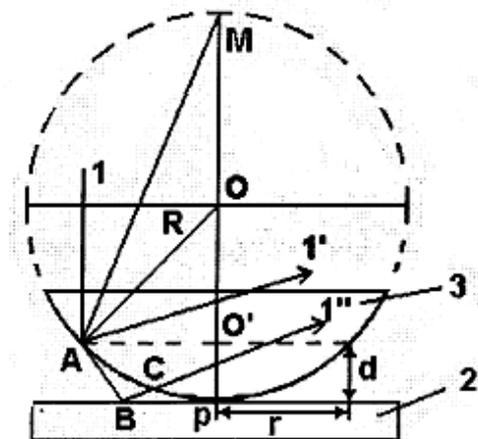


Рис. 1.

Таблица 1.

Фильтр $\lambda$					
№ кольца	$d$	$r = \frac{d_{нат}}{2}$	$d_{нат}$	$R$	$\langle R \rangle$
1					
2					
3					

**Вычисления:**

Контрольные вопросы

1. В чем состоит сущность явления интерференции света? При каких условиях световые волны интерферируют?
2. Объяснить метод получения интерференционной картины с помощью бипризмы Френеля.
3. Запишите условия максимума и минимума интенсивности при интерференции света от бипризмы Френеля.
4. Что такое интерференция «линий равной толщины»? На увеличенном чертеже покажите ход лучей и место возникновения интерференции.
5. Как изменится картина колец, если рассматривать ее в проходящем свете?
6. Почему в белом свете кольца окрашены?

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА****«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПОМОЩИ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ»**

**Цель работы:** изучение дифракционной решетки и определение длин волн спектра излучения лампы накаливания.

**Приборы и принадлежности:** набор дифракционных решеток, дифракционная линейка (пушка), лампа накаливания.

## Введение

Дифракционная решетка - это оптический прибор, представляющий собой прозрачную пластинку, на которую алмазным резцом нанесено большое количество (до 1000 на 1мм) тонких параллельных штрихов одинаковой ширины ( $b$ ) и равных расстояний между ними ( $a$ ). Величина  $a+b$  называется периодом или постоянной решетки ( $d$ ).

Если дифракционную решетку осветить параллельным пучком монохроматического света (свет одной длины волны), то за нею можно наблюдать, в определенных направлениях под углом  $\varphi$  к направлению падающего света, ряд максимумов света .

Наблюдение максимумов света можно осуществить с помощью линзы ( $L$ ), поставленной за дифракционной решеткой ( $R$ ) рис. 1.

На рис. 1 дана только одна точка А для угла  $\varphi$ . Вследствие явления дифракции (отклонение лучей на различные углы) произойдет интерференция световых лучей. Если источник света испускает свет различных длин волн, то в результате интерференции на экране появятся изображения щелей решетки, окрашенные в различные цвета (максимумы света). Если же источник света монохроматический, то кроме цветных изображений щелей наблюдаются еще и темные полосы - места, где в результате интерференции произошло полное гашение световых волн (световые минимумы). Вся картина на экране - совокупность максимумов - носит название дифракционных спектров. Условия возникновения максимумов света определяется из соотношения:

$$d \sin \varphi = \delta$$

где  $\delta$  - разность хода лучей.

Если  $\delta$  кратна целому числу волн, т.е.  $\delta = k \lambda$ , то имеем максимум света в точке А на экране и формула примет вид:

$$d \sin \varphi = k \lambda,$$

где  $d$  – постоянная дифракционной решетки,  $\varphi$  – угол дифракции,  $k$  – целое число, порядок спектра, номер спектра по отношению к нулевой (центральной) полосе ( $k=0, 1, 2, 3, \dots$ ),  $\lambda$  – длина волны монохроматического света. Это выражение является основой расчетной формулы для вычисления длины световых волн при помощи дифракционной решетки.

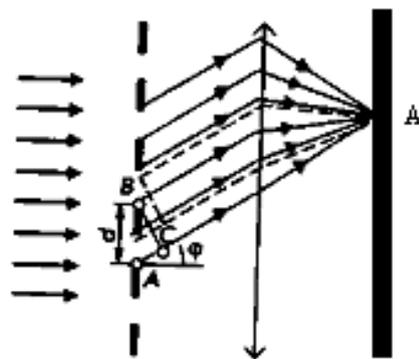


Рис. 1

### Описание экспериментальной установки

1. На рис.2 в штативе закреплена линейка с рамкой, в которую вставляется дифракционная решетка.
2. На линейке имеется ползунок со шкалой, который может перемещаться по линейке на любые расстояния.
3. Источник света (лампа) должен находиться на расстоянии 5-6 м. от дифракционной решетки.

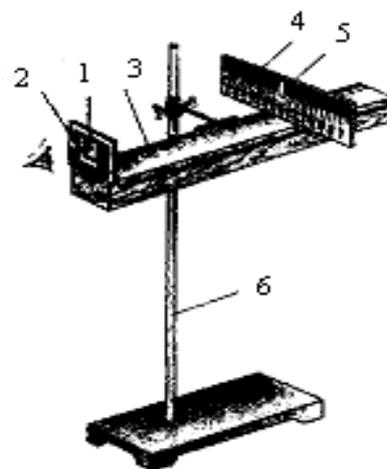


Рис. 2

### Выполнение работы

#### Задание 1. Определение длины световой волны.

1. В рамку на дифракционной линейке установите дифракционную решетку (постоянная решетки известна).
2. Ползунок со шкалой установите на выбранное расстояние (40-50 см).
3. Пронаблюдайте дифракционные спектры разных порядков через узкую вертикальную щель.
4. По линейке ползунка определите расстояние до фиолетовой границы спектра 1 порядка слева и справа от щели. Повторите наблюдение для красной границы спектра. Результаты занесите в таблицу 1.
5. Измерьте расстояние до красной и фиолетовой границы спектра 2 порядка слева и справа от щели. Результаты занесите в таблицу 1.

6. Ползунок со шкалой передвиньте на другое расстояние от дифракционной решетки и проделайте весь опыт еще раз. Результаты занести в табл.1.
7. Полученные данные позволяют легко вычислить тангенс угла, под которым рассматривают луч спектра, а затем и синус этого угла. Тангенс угла определите из треугольника (см. рис. 3)
8. Определите длину световой волны по формуле:

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k}; \quad \sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{l}{L}$$

Результаты занесите в таблицу 1.



Рис.3

Таблица 1.

№	Порядок спектра	Видимые границы спектра по шкале в мм (l)						Расстояние от дифракционной решетки до шкалы L	tg φ		Постоянная решетки d	Длина световой волны	
		Слева		Справа		Среднее знач.			φ	K		φ	K
		φ	K	φ	K	φ	K						
1.													
2.													
3.													

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление дифракции света?
2. Сформулировать принцип Гюйгенса-Френеля.
3. Что представляет собой дифракционная решетка?
4. Какие параметры характеризуют дифракционную решетку?
5. Какая формула используется для определения  $\lambda$ ?
6. Объяснить разложение света в дифракционном спектре.
7. В чем состоит отличие дифракционного спектра от дисперсионного?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### «ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. ЗАКОН МАЛЮСА»

**Цель работы:** усвоить методы получения и исследования поляризованного света, проверить закон Малюса.

#### Введение

В естественном свете поперечные колебания электрического вектора луча совершаются в различных плоскостях. Плоскополяризованный свет отличается от естественного тем, что в нем поперечные колебания электрического вектора совершаются в определенной плоскости, проходящей через направление распространения луча. Эту плоскость называют плоскостью колебаний, а перпендикулярную к ней, и тоже проходящую через луч - плоскостью поляризации. В частично поляризованном свете колебания

совершаются преимущественно в одной плоскости. Использование кристаллических пластинок для получения поляризованного света основано на явлении двойного лучепреломления в кристаллах. При падении естественного света на кристалл из него выходят 2 луча, они полностью поляризованы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

В кристаллах одноосных (например, в исландском шпате) имеется одно направление, вдоль которого не происходит раздвоения луча и свет не поляризуется. Такое направление называется оптической осью кристалла. Один луч, называемый обыкновенным, распространяется в кристалле по всем направлениям с одинаковой скоростью, его показатель преломления  $n_o$  не изменяется. Плоскость колебаний обыкновенного луча перпендикулярна к главной плоскости, которая проходит через оптическую ось и падающий на кристалл световой луч. Второй луч называется необыкновенным, т.к. он распространяется в кристалле в разных направлениях с разными скоростями и, следовательно, имеет различные показатели преломления. Значение показателя преломления необыкновенного луча, максимально отличающегося от значения последнего для обыкновенного луча, обозначается через  $n_e$ . Ряд кристаллов обладает свойством поглощать особенно сильно поляризованные лучи (например, кристаллы минерала турмалина, окрашенного в желтовато-зелёный цвет). Пластинка турмалина, вырезанная параллельно оптической оси, сильно поглощает в тонком слое обыкновенный луч и пропускает необыкновенный луч. Из пластинки турмалина выходит поляризованный луч, колебания которого параллельно оптической оси. Это явление неодинакового поглощения световых колебаний, различно направленных относительно оптической оси кристалла, называется плеохроизм. На явлении плеохроизма основано приготовление так называемых. поляроидно тонких плёнок из нитроцеллюлозы, в которую вкраплены микроскопические кристаллы, обладающие плеохроизмом. Особой обработкой достигается одинаковое расположение оптических осей всех кристаллов, вкрапленных в эту плёнку. Поляроиды обладают очень широким полем зрения, однако не обеспечивают полной поляризации света, особенно в синей области, и неодинаково прозрачны для лучей разных цветов

Всякое приспособление, служащее для поляризации света, называется поляризатором, а приспособление, позволяющее отличить естественный свет от поляризованного - анализатором. Один и тот же прибор может быть как поляризатором, так и анализатором.

Если на поляризатор падает луч, плоскость поляризации которого составляет угол  $\varphi$  с плоскостью поляризации лучей, пропускаемых анализатором, то интенсивность  $I_a$  пропущенного им света определяется законом Малюса:

$$I_a = I_n \cos^2 \varphi$$

где  $I_a$  -интенсивность света, падающего на поляризатор, и  $I_n$  интенсивность света, вышедшего из поляризатора.

При угле  $\varphi = 0^\circ$  поляризатор и анализатор считаются "параллельными" или "прозрачными". Если угол  $\varphi = 90^\circ$ , то возникнет полное затемнение поля, а поляризатор и

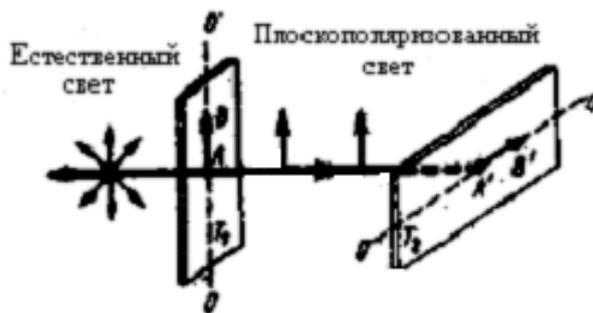


Рис. 1

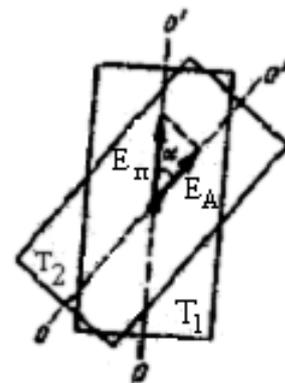


Рис. 2

анализатор считаются "скрещенными".

Если между поляризатором Р и анализатором А помещена двупреломляющая пластинка, вырезанная перпендикулярно оптической оси, или пластинка из прозрачного вещества, в котором создана искусственная анизотропия, то белый свет, прошедший из поляризатора через пластинку на анализатор, не будет вполне погашен ни при каком относительном положении указанных трёх объектов, но выйдет окрашенным. Исключение будет только в том случае, когда главные направления в пластинке совпадают с главными направлениями перекрещенных поляризатора и анализатора. Получающаяся окраска - не монохроматическая, а сложная (смешанная) и более или менее разбавленная примесью белого цвета.

Окраска зависит также и от угла падения света на пластинку. Когда свет проходит параллельным пучком и сама пластинка плоскопараллельна, то всё поле одинаково окрашено. Если пластинка не плоскопараллельна, то окраска будет различная, соответственно изменению толщины пластинки; так, сферически вогнутая или выпуклая пластинка даст цветные кольца, клинообразная - прямые полосы.

Описанное явление в общих чертах объясняется так: каждая монохроматическая волна поляризованного пучка света, вступая в двупреломляющую пластинку, вообще говоря, разделяется на две волны, поляризованные под прямым углом друг к другу, колебания в которых параллельны главным направлениям  $H_1$  и  $H_2$  (Рис.3).

Эти волны при небольшом угле падения и при малой толщине пластинки идут в ней почти по одному направлению и выходят из неё, почти совпадая. Пройдя пластинку с различными скоростями, они приобретают некоторую разность хода и, следовательно, соответствующую разность фаз.

Вследствие взаимной перпендикулярности колебаний они могут интерферировать; при этом получается свет, поляризованный эллиптически. Анализатор А из каждой волны пропускает лишь компоненты, поляризованные в одной плоскости. Эти волны интерферируют в зависимости от разности хода, полученной ими в кристаллической пластинке.

Эта разность хода различна для волн различного направления и различной длины. Таким образом, во входящем из поляризованной системы световом пучке монохроматические составные части присутствуют не в такой пропорции, как первоначально, и световой пучок становится окрашенным.

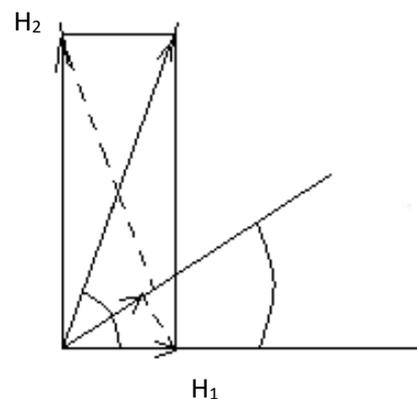


Рис. 3

### Задание 1 . Экспериментальная проверка закона Малюса

1. Соберите полярископ по схеме (рис.4), где S- осветитель, Р - поляризатор, А – анализатор, F - фотоэлемент люксметра.

Отъюстировав полярископ, установите А на максимум освещённости (на максимальный ток в микроамперметре люксметра). Отметьте это начальное положение А по лимбу (0) и освещённость (E), поверните далее А на некоторый угол  $\varphi$ , отсчитываемый от 0, и измерьте соответствующие значения. Данные занесите в таблицу 1.

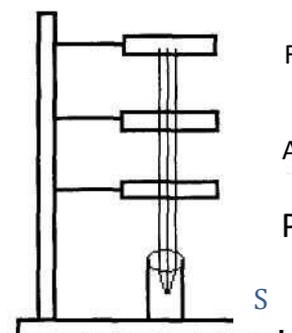


Рис. 4

Постройте график зависимости 
$$f(\varphi) = \frac{I}{I_{\max}}$$
 на

миллиметровой бумаге.

В той же координатной сетке постройте график функции:  $\cos^2 \varphi = f_T(\varphi)$ .

Проверьте совпадение экспериментальных точек с теоретической кривой.

Таблица 1.

<i>№ измерения</i>	$\varphi$	$\cos \varphi$	$\cos^2 \varphi$	$I$	$\frac{I}{I_{\max}}$	<i>№ измерения</i>	$\varphi$	$\cos \varphi$	$\cos^2 \varphi$	$I$	$\frac{I}{I_{\max}}$
1	$0^0$					8	$210^0$				
2	$30^0$					9	$240^0$				
3	$60^0$					10	$270^0$				
4	$90^0$					11	$300^0$				
5	$120^0$					12	$330^0$				
6	$150^0$					13	$360^0$				
7	$180^0$										

### Задание 2. Наблюдение двойного лучепреломления в исландском шпате

В полярископе, собранном на рис. 1, в качестве поляризатора Р используется ромбоэдр исландского шпата, укрепленный на стекле в оправе. На кристаллик направляется узкий пучок света. Отъюстируйте полярископ так, чтобы при наблюдении сверху было видно два светлых кружка. Поверните кристалл вокруг вертикальной оси, установите обыкновенный и необыкновенный лучи. Далее, поворачивая А, определите направления плоскости колебаний обыкновенного и необыкновенного лучей. Проанализируйте наблюдаемое явление.

### Задание 3. Наблюдение интерференции поляризованного света

1. Соберите полярископ по схеме рис.4 На столике между Р и А расположите препарат В из трёх тонких целлофановых дисков разной толщины. Поворачивая поочередно Р, В, А, наблюдайте изменение окраски дисков, объясните наблюдаемое явление .

2. Вместо В на столик между Р и А поместите кварцевый клин К. Прделайте то же, что в п.3.1.

### Задание 4. Наблюдение внутренних напряжений в твердых телах оптическим методом

В полярископ, собранный по рис.4, между Р и А поместите модель рельса из плексигласа, зажатую в держателе. Поворачивая Р и А, наблюдайте картину распределения напряжения в модели. Дайте объяснение наблюдаемому явлению.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать отличие поляризованного света от естественного.
2. Сформулировать закон Малюса.
3. Что такое анализатор и поляризатор и в чем их отличие.
4. Сформулировать закон Брюстера.
5. Объяснить явление двойного лучепреломления.
6. Перечислить приборы, позволяющие получать поляризованный свет.
7. Привести примеры использования поляризованного света.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### «ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ФОТОЭФФЕКТА»

**Цель:** изучить явление фотоэффекта и ознакомиться с разными типами фотоэлементов; научиться производить расчет чувствительности фотоэлементов, исследовать вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотоэлементов.

#### Введение

**Внешний фотоэффект** – явление вырывания электронов из вещества под действием света.

#### Законы фотоэффекта:

1. Максимальная начальная скорость  $v_{\max}$  фотоэлектронов зависит от частоты света и свойств поверхности металла. Она не зависит от освещенности катода.
2. Общее число фотоэлектронов  $n$ , которые вырываются светом из катода за единицу времени, и сила  $I_n$  фототока насыщения прямо пропорциональны освещенности катода.
3. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта (порог фотоэффекта) – такая наименьшая частота  $\nu_{\min}$  (или наибольшая, «красная» длина волны  $\lambda_{\max}$ ), при которой еще возможен внешний фотоэффект. При  $\nu \leq \nu_{\min}$  ( $\lambda \geq \lambda_{\max}$ ) фотоэффекта быть не может.

Фототок в вакуумном фотоэлементе при постоянном световом потоке  $\Phi = \text{const}$  (при увеличении анодного напряжения достигает насыщения).

Фототок в газонаполненном фотоэлементе при постоянном световом потоке  $\Phi = \text{const}$  (при увеличении анодного напряжения плавно возрастает, при достаточно большом напряжении у этого фотоэлемента сила тока резко возрастает и **начинается самостоятельный разряд**, что недопустимо!

Уравнение фотоэффекта:  $h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}$  (1), где  $v_{\max}$  - максимальная скорость вылетевшего электрона;  $m$  - масса электрона;  $h$  – постоянная Планка;  $\nu$  - частота;  $A_{\text{вых}}$  - работа выхода электрона.

**Красная граница фотоэффекта** находится из условия  $h\nu_{\text{кр}} = A_{\text{вых}}$ , при  $h\nu_{\text{кр}} < A_{\text{вых}}$  фотоэффект невозможен - электроны не вырываются наружу,  $v_{\max} = 0$ .

#### Чувствительность фотоэлемента

$$\gamma = \frac{I}{\Phi} \quad (2)$$

ВАХ освещенного вакуумного фотоэлемента имеет вид (рис. 1):

$I_{\text{нас}}$  - ток насыщения в точке А -  $U=0, I \neq 0$ ; в точке В -  $U \neq 0, I=0$ :  $U_3 = -U_3$  - задерживающийся потенциал.

Максимальная кинетическая энергия электронов связана с задерживающим потенциалом -  $U_3$ , при котором ток прекращается, соотношением:

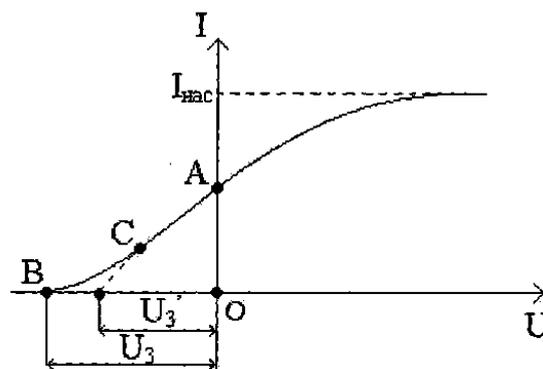


Рис. 1

$$\frac{m g_{\max}^2}{2} = e U_3 \quad (3)$$

Схема установки дана на рис. 2:

ВУП - регулируемый выпрямитель, mA - микроамперметр, V - вольтметр; источник света - лампа накаливания.

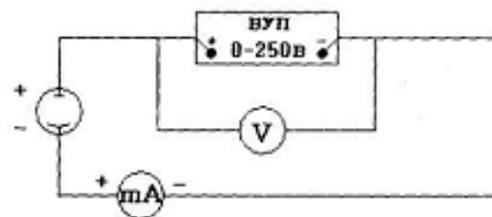


Рис. 2

### Выполнение работы

**Задание № 1. Определение зависимости тока фотоэлемента от анодного напряжения** (схема расположения приборов на рис. 3, где О - осветитель, С<sub>ф</sub> - светофильтр, L - расстояние от источника до фотоэлемента).

1. Установите вакуумный (газонаполненный) фотоэлемент, соблюдая полярность, указанную на схеме, закрепите на фотоэлемент защитный кожух.
2. Регулятором на ВУП изменяя напряжение через 20 В, измерьте фототок. Перед измерением включить осветитель, установить световой поток. Измерение проводить до 140 В (всего 7 точек) - для белого света, фиолетового и красного.
3. Результаты занесите в таблицу 1 для белого, фиолетового, красного света.

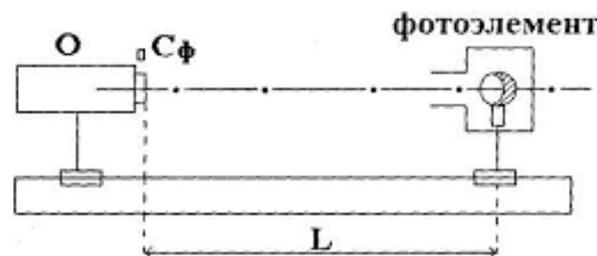


Рис. 3

Таблица

1.

Свет U, В	0	20	40	60	80	100	120	140
белый I, А								
красный I, А								
фиолетовый I, А								

4. Постройте графики  $I=f(U)$  для трех случаев на миллиметровой бумаге.

### Задание №2. Расчет чувствительности фотоэлементов

1. Найдите световой поток  $\Phi$ , падающий на фотоэлемент по показанию люксметра, дающего значение освещенности E при фиксированном L и известному диаметру окна фотоэлемента d.

$$\Phi = \frac{\pi d^2}{4} E \quad (4)$$

2. На место окна фотоэлемента поставьте люксметр, измерьте E при данных L. По (4) рассчитайте  $\Phi$ . Проведите для белого, фиолетового и красного цветов.
3. Зная световой поток  $\Phi$ , рассчитайте чувствительность для указанного фотоэлемента по формуле (2).

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое фотоэффект?
2. Записать уравнения фотоэффекта.
3. Сформулируйте законы фотоэффекта Столетова.
4. Существует ли явление обратное фотоэффекту? Ответ обосновать.
5. Что такое внутренний фотоэффект? Объяснить.
6. Записать формулу для фотоэффекта.
7. Объясните ВАХ для вакуумного и газонаполненного фотоэлемента.
8. Какие закономерности фотоэффекта не удастся объяснить с позиций волновой теории света?