МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Колледж СамГТУ

А.С. Чипура

ФИЗИКА

Методические указания
к лабораторным работам

Самара
Самарский государственный технический университет
2024

Печатается по решению методической комиссии Колледжа СамГТУ (протокол № 3 от 22.11.2024 г.).

Составитель: Чипура А.С.

Физика: методические указания к лабораторным работам по физике для студентов СПО / *А.С. Чипура*. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2024. –56с.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по специальности среднего профессионального образования 08.02.02. Строительство и эксплуатация инженерных сооружений.

Методические указания включают в себя комплект методических материалов, необходимых для успешной подготовки и участия в проведении лабораторных работ по дисциплине «Физика» студентам СПО.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……4
1. Определение ускорения свободного падения……....5
2. Изучение законов столкновения тел……..13
3. Определение отношения теплоёмкостей воздуха методом Клемана – Дезорма……..…20
4.Определение вязкости жидкости методом стокса……...28
5. Определение температурного коэффициента сопротивления металла……34
6. Измерение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля земли …..39
7.Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки ……...45
8.Светотехнические характеристики и световое поле лампы накаливания……51

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы – это эффективное средство связи теории с практикой. Их выполнение способствует формированию у студентов экспериментальных умений и навыков, а также умений и навыков практического характера, развитию познавательных способностей, формированию активности и самостоятельности.

После задания, выданного преподавателем, студент самостоятельно работает с инструкцией, учится правильно организовывать свое рабочее место, рационально планировать работу по выполнению учебного задания, находить наиболее рациональные способы решения поставленных задач, правильно фиксировать результаты выполненных замеров, экспериментов и описать их, формулировать выводы.

Рекомендуется следующая схема подготовки к лабораторной работе:

1) ознакомление с планом лабораторной работы, который отражает содержание предложенной темы;

2) проработка конспекта лекции;

3) чтение рекомендованной литературы;

4) подготовка ответов на контрольные вопросы лабораторной работы;

5) выполнение тестовых заданий, задач и др.

6) подготовка отчета по выполненной работе.

В пособии кратко рассмотрены теоретические положения, необходимые для выполнения лабораторной работы, подробно изложена методика эксперимента, описан порядок выполнения лабораторной работы и обработки результатов прямых измерений, содержание и правила оформления отчета по лабораторной работе.

Лабораторная работа №1

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА»

Цель работы. Овладение методами оценки погрешности; определение ускорения свободного падения с помощью малых свободных колебаний математического маятника.

Приборы и принадлежности.

Нить, грузик, миллиметровая линейка или измерительная лента (рулетка).

Порядок выполнения работы.

1. Провести многократные измерения времени, в течении которого три различных по длине математических маятника совершат фиксированное количество полных колебаний.
2. Результаты прямых многократных измерений обработать методом Стьюдента.
3. Рассчитать, средние значения ускорения свободного падения $\langle g \rangle$ и абсолютную погрешность косвенных измерений Δg.
4. Сравнить полученные значения $\langle g \rangle$ с его табличным значением.
5. Сделать выводы по результатам выполнения работы.

Теоретические положения

Для экспериментального определения значения ускорения свободного падения g разработано много различных методов. Совокупность этих методов, при которых наблюдается движение тела под действием силы тяжести, а непосредственно измеряемой величиной является время, необходимое телу для перехода от одного фиксированного положения в другое получили название динамических методов. Среди них, наиболее широкое распространение, получил маятниковый метод.

В физике под маятником понимают твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной точки или оси. Принято различать физический и математический маятники.

Физический маятник представляет собой твердое тело, которое может свободно колебаться под действием силы тяжести вокруг неподвижной горизонтальной оси, не проходящей через центр масс.

Математический маятник – это идеализированная система, состоящую их материальной точки массой m, подвешенной на абсолютно нерастяжимой и невесомой нити длиной L, и колеблющаяся под действием силы тяжести (рис. 1).

Характер колебаний математического маятника определяется зависимостью угла □, образованного нитью с вертикалью, от времени t, т.е. □(t).Данная зависимость определяется свойства- ми среды, в которой находится маятник, а также величиной максимального смещения маятника от положения равновесия □$_0$.

Пусть в системе сопротивления столь малы, что ими можно пренебречь, и пусть максимальный угол отклонения маятника □$_0$ составляет величину не более чем 15□ (0,262 рад) (sin15□=0,259, т.е.

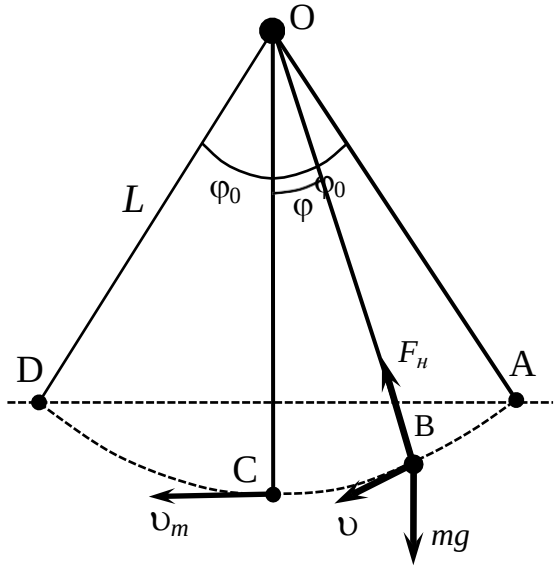


Рис. 1.

sin□$_0$□□$_0$). Тогда угловое смещение маятника будет изменяться с течением времени приблизительно по гармоническому закону (описываться функциями синусов или косинусов), т.е.

□□t□□□$_0$cos□□$_0t$□□$_0$□или□□t□□□$_0$sin□□$_0t$ □□$_0$□□,

где t–текущее время; □□$_0t$□□$_0$□–фаза колебаний;□$_0$–круговая (циклическая) частота;□$_0$–начальная фаза, т.е. фаза соответствующая отклонению маятника в момент времени t=0.

В этом случае, формула для периода колебаний математического маятника имеет следующий вид:

$$T \square 2\square \sqrt{\frac{L}{g}}. \qquad (1)$$

где L–длина маятника; g–ускорение свободного падения.

Из этой формулы следует, что при малых углах отклонения от положения равновесия период колебаний математического маят- ника не зависит от его массы и амплитуды колебаний, а определяется лишь длиной маятника L и значением ускорения свободного падения тел g в данном месте пространства. Поэтому, эту формулу можно использовать для экспериментального определения ускорения свободного падения тел в поле тяготения Земли:

$$g \square\square 4\square^2 \frac{L}{T^2} \qquad (2)$$

Если в течении времени t математический маятник совершил N полных колебаний, то период колебаний может быть вычислен по формуле:

$$T = t/N. \qquad (3)$$

Из формул (2) и (3) получаем следующее выражение для ускорения свободного падения:

$$g \square\square 4\square^2 \frac{LN^2}{t^2}. \qquad (4)$$

Порядок выполнения работы

1. Самостоятельно изготовить математический маятник длиной не менее чем 60 см. В качестве груза можно взять гайку, грузило для рыбалки, или другое тяжелое тело небольших размеров. Прочно соединить груз с нитью. Точку подвеса маятника можно расположить на краю стола или стула, книжной полке и т.д.

2. Рассчитать по формуле N_B= (30 + 2□В), где В – номер бригады в преподавательском журнале, число полных колебаний маятника. Результат занести в табл. 1.

ВНИМАНИЕ. *В каждом опыте значение числа полных колебаний маятника N_B должна быть одинаковой.*

3. Жестко закрепить нить маятника в точке подвеса. Измерить расстояние от точки подвеса до ***центра масс***!!!подвешенного груза (длина математического маятника L). Результат измерений занести в табл. 1.

Положение центра масс груза в данной работе определяется приблизительно. Эту ошибку можно уменьшить, если значение абсолютной погрешности длины нити маятника □L принять равным

□L=2мм.

4. Отклонить маятник на небольшой угол (□< 15□) от положения равновесия. При этом необходимо чтобы нить не провисала. Далее, максимально аккуратно, отпустить грузик.

5. После нескольких колебаний определить время t_i, в течении которого маятник совершит N_B =30…50 полных колебаний. При этом секундомер необходимо пускать в ход и начинать счет полных колебаний в момент, когда маятник находится в одном из ***крайних положений***!!!.

Результат измерений времени t_i занести в табл.1.

6. Провести измерения(п4ип5) не менее 5 раз.

7. Уменьшая каждый раз длину нити маятника приблизительно на 5 см, таким же путем (см. п3 – п5) определить времена t_i еще для трех значений длины маятника. Результаты этих измерений занести в соответствующие таблицы.

Таблица 1

Результаты прямых измерений

№опыта	N_B	L, м	t_i, с
1			
…			
K			

Обработка результатов измерений и расчёт погрешностей

Результаты многократных прямых измерений, приведенные в табл. 1 необходимо обработать методом Стьюдента. Для этого необходимо.

1. Найти средние арифметические значения времени $t\langle\ \rangle$

2. Вычислить величины случайных отклонений времени

$$\square_i \square \left| \langle t \rangle \square t_i . \right|$$

3. Вычислить квадраты случайных отклонений: $\square_i^2$.
4. Вычислить среднее квадратичное отклонение среднего ариф- метического:

$$S_K \square \sqrt{\frac{1}{K(K-1)} \sum_{i=1}^{N} \varepsilon_i^2} .$$

5. Определить коэффициент Стьюдента $k_{\square,K}$, зависящий от числа проведённых измерений K и доверительной вероятности $\square$. В прил. 2 приведены значения коэффициентов Стьюдента, для различных значений доверительной вероятности.

6. Вычислить случайную погрешность среднего арифметичес- кого значения времени совершения N_B колебаний (оценочное значение абсолютной погрешности):

$$\square t \square \square S_K k_{\square,K} .$$

7. Результаты выполнения пунктов 1 – 6 представить в виде табл. 2.

Таблица 2

Обработка результатов прямых измерений

L	№ опыта	t_i	$t \langle \rangle$	$\square_i$	$\square_i^2$	S_K	$k_{\square,K}$	$\square t$
	1							
	…							
	K							

	1							
	…							
	K							
	1							
	…							
	K							

8. Для каждой серии измерений записать окончательные результаты обработки прямых измерений времени совершения N_B полных колебаний в соответствии с требованиями, предъявляемыми к форме записи результата измерения физической величины:

$$t_1 = \langle t_1 \rangle \pm \Delta t_1, \quad t_2 = \langle t_2 \rangle \pm \Delta t_2, \quad t_3 = \langle t_3 \rangle \pm \Delta t_3, \quad t_4 = \langle t_4 \rangle \pm \Delta t_4.$$

9. Вычислить для каждой серии измерений относительные погрешности измерения времени:

$$\delta t = \frac{\Delta t}{\langle t \rangle}$$

10. Используя данные п.8 и табл.1, по формуле

$$\langle g \rangle = 4\pi^2 \frac{N_B^2}{\langle t \rangle^2} \langle L \rangle$$

вычислить среднее значение величины ускорения свободного падения в каждой серии измерений $\langle g \rangle$.

11. Вычислить по формуле

$$\Delta g = \langle g \rangle \sqrt{4\left(\frac{\Delta t}{\langle t \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{\langle L \rangle}\right)^2},$$

абсолютные погрешности значения ускорения свободного падения в каждой серии измерений.

12. Записать окончательный результат в соответствии с требованиями, предъявляемыми к форме записи результата измерения физической величины (см. [2]):

$$g_i = \langle g_i \rangle \pm \Delta g_i.$$

13. Вычислить относительную погрешность измеренного значения ускорения свободного падения в каждой серии измерений:

$$\square g_i \ \square \frac{\square g_i}{\langle \dot{g_i} \rangle}$$

14. Сравнить результаты п. 12 с табличным значением ускорения свободного падения.

15. Оформить отчет по результатам работы.

КОНТРОЛЬНЬЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение гармонических колебаний. Напишите уравнение таких колебаний, поясните физический смысл величин, входящих в него.
2. В каких точках траектории тела математического маятника имеет максимальную скорость, потенциальную энергию, кинетическую энергию, ускорение, силу натяжения нити.
3. Вывести уравнение колебаний математического маятника(1).
4. Вывести формулу для периода колебаний математического маятника (1).
5. Как изменится период математического маятника, если изменить его длину, амплитуду колебаний?
6. Как влияет число полных колебаний на точность используемого метода?
7. Назовите виды погрешностей, которые возникают при экспериментальном определении физических величин.
8. Дайте определение следующих понятий:

   а)среднее арифметическое результатов измерений;

   б)средняя квадратичная погрешность среднего результата.
9. Опишите порядок обработки результатов при прямых измерениях.
10. Какие погрешности называются косвенными?
11. Расскажите порядок обработки экспериментальных результатов при косвенных измерениях.
12. Какая погрешность называется абсолютной? Относительной?

Приложение 1

Величины коэффициента Стьюдента $k_{\alpha,K}$

для различных значений доверительной вероятности α

При обработке прямых измерений в лабораторном практикуме по физике рекомендуемое значение доверительной вероятности равно α= 0,95 (95%). Более высокая надежность 0,99 или 0,999 требуется только при очень точных и ответственных экспериментах. В табл. 4 приведены значения коэффициентов Стьюдента, для различного числа экспериментов и различных значений доверительной вероятности.

Таблица4

Число измерений K	Доверительная вероятность			
	α=0,90	α=0,975	α=0,995	α=0,9995
2	6,314	12,706	63,657	636,619
3	2,920	4,303	9,925	31,598
4	2,353	3,182	5,841	12,941
5	2,132	2,776	4,604	8,610
6	2,015	2,571	4,032	6,859
7	1,943	2,447	3,707	5,959
8	1,895	2,365	3,499	5,405
9	1,860	2,306	3,355	5,041
10	1,833	2,262	3,250	4,781
11	1,812	2,228	3,169	4,587
12	1,796	2,201	3,106	4,437
13	1,782	2,179	3,055	4,318
14	1,771	2,160	3,012	4,221
15	1,761	2,145	2,977	4,140
16	1,753	2,131	2,947	4,073
17	1,746	2,120	2,921	4,015
18	1,740	2,110	2,898	3,965
19	1,734	2,101	2,878	3,922
20	1,729	2,093	2,861	3,883
30	1,699	2,045	2,756	3,659

Из таблицы видно, что для определенного числа измерений K увеличение доверительной вероятности сопровождается увеличением $k_{\alpha,K}$ а, следовательно, и увеличением абсолютной погрешности Δt, т.е. доверительный интервал становится шире.

Лабораторная работа № 2

«ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ СТОЛКНОВЕНИЯ ТЕЛ»

Цель работы: ознакомиться с явлением удара на примере соударения подвешенных на нитях шариков.

Оборудование: измерительная установка, набор шариков, технические часы.

Теория

В механике под ударом следует понимать кратковременное взаимодействие двух или более тел, возникающих в результате их соприкосновения. При соударении друг с другом они претерпевают деформацию. При этом кинетическая энергия, которой обладают тела перед ударом, частично или полностью переходит в потенциальную энергию упругой деформации и во внутреннюю энергию тел. Существует два предельных вида удара: абсолютно упругий и абсолютно неупругий. *Абсолютно упругим* называется такой удар, при котором механическая энергия тел не переходит в другие, немеханические, виды энергии. *Абсолютно неупругий удар* характеризуется тем, что потенциальная энергия деформации не возникает, кинетическая энергия тел полностью или частично превращается во внутреннюю энергию.

Абсолютно упругих ударов в природе не существует, так как всегда часть энергии затрачивается на необратимую деформацию тел и на увеличение их внутренней энергии. Однако, для некоторых тел, например, стальных шаров потерями механической энергии можно пренебречь.

В настоящей работе рассматривается удар шаров, подвешенных в виде маятников, причем один шар до удара покоится (v_1= 0). Удар происходит в положении, соответствующем равновесию тел, и является *центральным и прямым.* Это значит, что при ударе центры тяжести тел лежат на линии удара, а их относительная скорость параллельна линии удара.

Примеряя к ударяющимся шарам закон сохранения импульса, можно написать: для абсолютно упругого удара -

$$m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \qquad (1,а)$$

и для абсолютно неупругого удара- $m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v_1''$. (1,б)

Здесь m_1, m_2-массы шаров, v_1', v_2'-скорости шаров после упругого удара, v_1''- общая скорость шаров после абсолютного неупругого удара.

Рассмотрим центральный абсолютно упругий удар двух шаров.

Силы, возникающие при деформации шаров, в процессе соударения меняются во времени. Найдем среднюю по времени силу, действующую на один из шаров. По определению средняя сила равна

$$\vec{F} = \frac{1}{t_1 - t_0}\int_{t_0}^{t_1} \vec{F}\,dt \qquad (1)$$

Согласно второму закону динамики ***F= dP/dt***, тогда

$$\vec{F} = \frac{1}{t_1 - t_0}\int_{t_0}^{t_1} dP = \frac{\vec{P}_1 - \vec{P}_0}{t_1 - t_0} = \frac{\vec{P}}{\tau} \qquad (2)$$

где P_0-импульс шара до удара,

P_1-импульс шара после удара,

t_1-t_0=τ-время соударения. Модуль средней силы

$$\langle F\rangle = \Delta P/\tau \qquad (3)$$

Если первый шар до удара покоился (***P_0=0***),то ***ΔP=P_1***.Если массы шаров одинаковы (***m_1=m_2***),то $\vec{P}_1 = \vec{P}_2$,т.е.второй шар при ударе весь свой импульс передает первому шару и останавливается.

Тогда

$$\langle F\rangle = P_2/\tau = m_2 v_2/\tau \qquad (4)$$

При известной массе шаров среднюю силу удара <***F***>всегда можно вычислить, зная скорость шара ***v_2*** в момент, непосредственно предшествующий соударению, и время соударения ***τ***.

Скорость шара непосредственно перед ударом ***v_2*** можно определить по углу ***α*** отклонения шара от положения равновесия (рис. 1). Шар, отведенный от положения равновесия на угол ***α,*** обладает запасом потенциальной энергии ***E_n = mgh.*** Эта энергия к моменту удара полностью переходит в кинетическую ***$E_к$=$mv_2^2/2$***,
следовательно, ***mgh=$mv_2^2/2$***, отсюда

$$v_2 = \sqrt{2gh} \qquad (5)$$

где ***h***-высота подъема шара в крайнем положении.

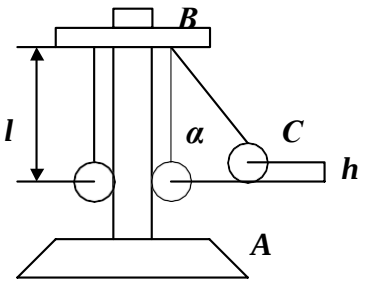


Рис.1.

Из ***ΔABC*** (рис.1)следует: ***l-h=lcosα,*** откуда ***h=l(1-cosα)=2lsin²(α/2)***.

Подставляя ***h*** в уравнение (5) получим

$$v_2 = 2\sqrt{gl}\cdot \sin^2(\alpha/2). \qquad (6)$$

Подобным образом можно записать выражения для скоростей

$$v_1' = 2\sqrt{gl} \cdot \sin^2(\alpha_1'/2),$$
$$v_2' = 2\sqrt{gl} \cdot \sin^2(\alpha_2'/2), \qquad (7)$$
$$v_1'' = 2\sqrt{gl} \cdot \sin^2(\alpha_1''/2),$$

где α_1', α_2' - углы отклонения шаров после упругого удара, а α_1''- угол отклонения первого шара после абсолютно неупругого удара.

ОПИСАНИЕУСТАНОВКИ

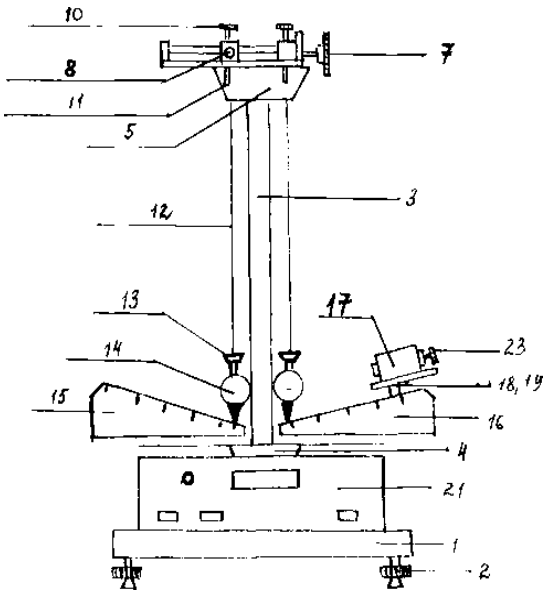


Рис.2.

Общий вид прибора для исследования столкновения шаров представлен на рис. 2.Основание ***1*** оснащено регулируемыми ножками ***2***, которые позволяют произвести выравнивание прибора. В основании закреплена колонка ***3***, к которой прикреплен нижний кронштейн ***4*** и верхний ***5***. На верхнем кронштейне прикреплены кронштейны со стержнями ***6*** и вороток ***7***, служащий для установки расстояния между шарами. На стержнях ***6*** помещены передвигаемые держатели ***8*** с втул- ками ***9***,фиксированные при помощи болта ***10*** и приспособленные к прикреплению подвесов ***A11***. Через подвесы ***1*** проведены провода ***12***, подводящие напряжение к подвесам **B13**, а через них к шарам ***14***. После отвинчивания винтов в подвесах ***A*** можно установить длину подвески шаров. На нижнем кронштейне закреплены угольники со шкалами ***15,16***, а на специальных направляющих – электромагнит 17.
После отвинчивания болтов ***18, 19*** электромагнит можно передвигать вдоль правой шкалы и фиксировать высоту его установки. Силу электромагнита можно регулировать воротком ***23***. Угольники со шкалами также могут передвигаться вдоль нижнего кронштейна. Для изменения их положения надо опустить гайки ***2***, подобрать положение угольников, а затем довинтить гайки. К основанию прибора

Привинчен микросекундомер ***21***, передающий разъем ***22*** напряжение к шарами электромагниту.

ИЗМЕРЕНИЯ

1. Гайки подвесов ***B*** переместить максимально вверх, а затем на подвесы навинтить два произвольно выбранных шара.

2. Вращая воротком ***7***, помещенным на верхнем кронштейне, установить та- кое расстояние между стержнями ***6***, чтобы шары соприкасались друг с другом.

3. Опустить болты ***10*** и переместить держатели ***8*** в положение, в котором лезвия подвесов ***B*** будут находиться в одной плоскости с угольниками со шкалами ***15, 16***. Затянуть

болты ***10***.

4. Опустить винты подвесов ***A11*** и установить такую длину проводов ***12***, чтобы на высоте угловых шкал находились только лезвия подвесов ***B***, а черточки на шарах находились на одном уровне, затянуть винты подвесов ***A***.

5. Произвести корректировку осевой установки шаров. Для этой цели шар, который занял высшее положение, легко вывернуть, доводя до равенства уровней черточек на шарах, и затянуть гайку подвесов ***B***. Диапазон возможной корректи- ровки 0□4 мм.

6. Опустить гайки ***20*** и таким образом установить угольники ***15, 16,*** чтобы лезвия подвесов ***B*** в момент, когда шары занимают положение покоя, показывали на шкалах нуль. Затянуть гайки ***20***.

7. Опустить болты ***18, 19***. Установить электромагнит на избранном расстоя- нии от начала шкалы и на такой высоте, чтобы его ось была удлинением черточки на шаре. Затянуть болты ***18, 19.***

8. Включить микросекундомер в сеть.

9. Нажать клавишу“СЕТЬ” микросекундомера.

10. Отжать клавишу“ПУСК”.

11. Воротком ***23*** отрегулировать силу электромагнита, чтобы он удержал шар.

12. Правый шар отодвинуть в сторону электромагнита и блокировать в этом положении, левый-установить неподвижным в положении покоя.

13. Прочитать значение угла.

14. Нажать клавишу“СБРОС”.

15. Нажать клавишу“ПУСК”.

16. После столкновения шаров, наблюдать на какое угловое расстояние α_1'и α_2'или α_1'' отскочат шары. Просчитать продолжительность столкновения шаров.

Столкновение должно быть центральным, т.е. траектория движения шаров после столкновения должна находиться в плоскости движения правого шара до столкновения.

17. Измерения углов отражения α_1' , α_2'или α_1'' и продолжительности столкновения произвести не менее 5 раз и на их основании определить средние значения углов и времени по следующим формулам:

где $\alpha_1', \alpha_2', \alpha_1''$ - среднее значение угловых расстояний после столкновения шаров,

τ-среднее значение продолжительности столкновения,

n-количество выполненных измерений,

$\alpha_{1i}', \alpha_{2i}'$или$\alpha_{1i}''$-значения, полученные в i-ом измерении.

18. При помощи мерной ленты определить длину подвески шаров, как крат- чайшее расстояние между стержнем верхнего кронштейна и центом шара. Изме- рения выполнить с точностью ± 2мм.

19. По формулам (6) и (7) определить скорости шаров до и после столкно- вения.

20. На аналитических весах взвесить шары и найти массы шаров вместе с подвесами ***B***.

21. Масса подвеса ***B*** равна 20,5г.

22. Требуемая точность измерений m_1 и m_2 - 0,1г.

ЗАДАНИЕ

1. Для двух пар металлических шаров, используя формулу (4), определить среднюю силу удара <***F***>при различных углах отклонения α_2шара от положения равновесия.

Для каждого угла $\boldsymbol{\alpha_2}$ измерения времени соударения $\boldsymbol{\tau}$ провести три раза. Взять не менее пяти значений углов.

Относительную скорость шаров $\boldsymbol{v_2}$ вычислить по формуле (6).

Результаты измерений записать в таблицу1.

Таблица1.

№ п/п	m, кг	l, м	α_2	v_2, м/с	Δv_2, м/с	τ_1, с	τ_2, с	τ_3, с	$\tau_{ср}$, с	$\Delta\tau$, с	$\Delta\tau_{ср}$, с	$\langle F\rangle$, Н	$\Delta(\langle F\rangle)$, Н	δ, %
1.														
2.														
3.														
4.														
5.														

Δm=...кг, Δl=...м, $\Delta\alpha_2$=...,

$$\frac{\Delta v_2}{v_2} = \frac{1}{2}\frac{\Delta l}{l} + \frac{1}{2}\Delta\alpha_2 \, ctg\frac{\alpha_2}{\alpha};$$

$$\Delta v = v_2(\Delta v_2/v_2)$$

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\tau - \tau_i)^2}{n(n-1)}},$$

$$\frac{\Delta(\Delta F)}{\Delta F} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta\tau}{\tau}$$

$$\Delta(\Delta F) = \Delta F \cdot \left(\frac{\Delta(\Delta F)}{\langle F\rangle}\right)$$

$$\delta = \frac{\Delta(\Delta F)}{\langle F\rangle} \cdot 100\%$$

2. Построить график и зависимости модуля средней силы <F> от относи- тельной скорости v_2 для каждой пары шаров.

3. Проверить выполнение закона сохранения импульса:

а)для абсолютно упругого удара двух металлических шаров-выражение (1,а)

$$P = P',$$

где P-импульс системы двух шаров до удара,

P'-импульс системы двух шаров после упругого удара. Результаты измерений записать в таблицу 2.

Таблица2.

l, м	m_1, кг	m_2, кг	α_2	v_2, м/с	α_{11}'	α_{12}'	α_{13}'	α_1'	v_1', м/с	α_{21}'	α_{22}'	α_{23}'	$\alpha_{2ср}'$	v_2', м/с	P	P'	δ, %

$$\delta = \frac{P - P'}{P} \cdot 100\%$$

б) для абсолютно неупругого удара двух пластилиновых шаров-выражение (1,б)

$$P = P''$$

где ***P”***- импульс системы двух шаров после абсолютно неупругого удара. Результаты измерений записать в таблицу3.

Таблица3.

l, м	m_1, кг	m_2, кг	α_2	v_2, м/с	α_{11}'	α_{12}'	α_{13}'	α_1''	v_1'', м/с	***P***	***P”***	***δ***, %

$$\delta = \frac{P - P''}{P} \cdot 100\%$$

КОНТРОЛЬНЫЕВОПРОСЫ

1. Что такое абсолютно упругий и неупругий удары?
2. Как происходит процесс соударения шаров?
3. Как определяется модуль средней силы при соударении шаров?
4. Сформулируйте закон сохранения импульса и закон сохранения энергии.
5. Почему к явлению удара можно применить закон сохранения импульса?

Лабораторная работа № 3

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗОВ ПО МЕТОДУ КЛЕМАНА - ДЕЗОРМА»

Цель: сравнить теплоемкости воздуха методом Клемана – Дезорма.

Теория: прибор Клемана-Дезорма состоит из баллона с воздухом, насоса Комовского и водяного манометра (рис.1). При закрытом кране в баллон накачивают воздух. Через 2-3 минуты температура воздуха в баллоне становится равной температуре T_1 окружающей среды, а давление $p_1 = p_0 + \rho g h_1$, где p_0 - атмосферное давление, ρ - плотность манометрической жидкости (подкрашенная вода), g - ускорение силы тяжести, h_1 - разность уровней жидкости в манометре (рис.2а).

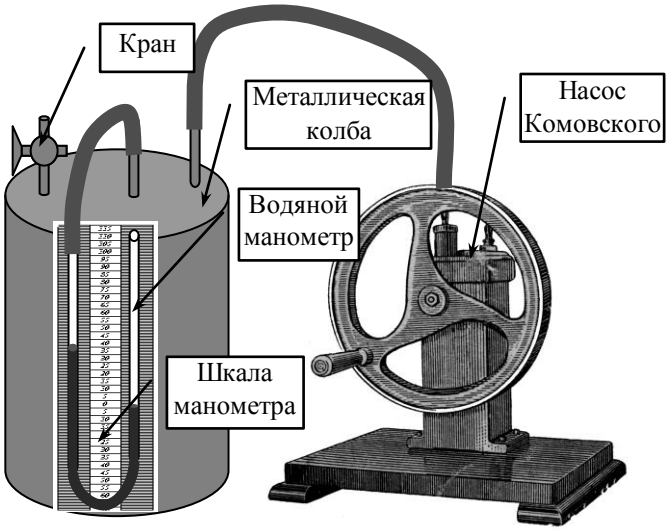


Рис.1

Затем открывают кран на короткое время, достаточное для выравнивания давления в сосуде с атмосферным (рис.2б), и закрывают его. За счет кратковременности процесса в баллоне осуществляется адиабатическое (практически без теплообмена) расширение воздуха массой m, которая остается в сосуде после закрывания крана. Эта масса воздуха занимала до расширения объем V_1 - часть объема Vc сосуда. После адиабатного расширения воздух массой m переходит из состояния 1 в состояние 2 (рис.3). Объем его становится равным $V_2 = Vc$, давление $P_2 = P_0$ (рис.2б). Так как при адиабатическом расширении, работа совершается воздухом (массой m) за счет убыли его внутренней энергии, то это означает понижение температуры воздуха до $T_2<T_1$. При этом давление и объем в состояниях 1 и 2 связаны между собой уравнением Пуассона: $P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$. Через 2-3 минуты, вследствие теплообмена со стенками колбы, воздух в баллоне изохорически нагревается до температуры T_1 (рис.2с, процесс 2 => 3 на рис.3). При неизменном объеме ($V_2 = V_3$) давление возрастает до $P_3 = p_0 + \rho \cdot g h_2$, где h_2 - разность уровней жидкости в манометре для воздуха в состоянии 3. Воздуху массой m в состояниях 1 и 3 соответствует одинаковая температура T_1 окружающей среды. Поэтому состояния 1 и 3 на рис.3 оказываются лежащими на одной изотерме (пунктирная линия) и к ним применимо уравнение изотермического процесса (закон Бойля-Мариотта): $P_1V_1 = P_3V_2$. Возведя последнее соотношение в степень γ, и поделив его на равенство $P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$, получим $\frac{P_1^{\gamma}V_1^{\gamma}}{P_1V_1^{\gamma}} = \frac{P_3^{\gamma}V_2^{\gamma}}{P_2V_2^{\gamma}}$ или $P_1^{\gamma-1} = P_3^{\gamma}/P_0$.

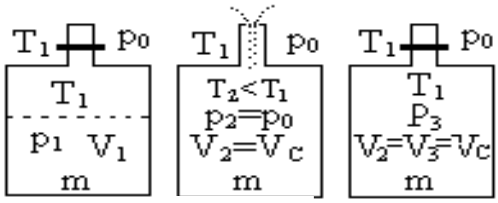


Рис. 2

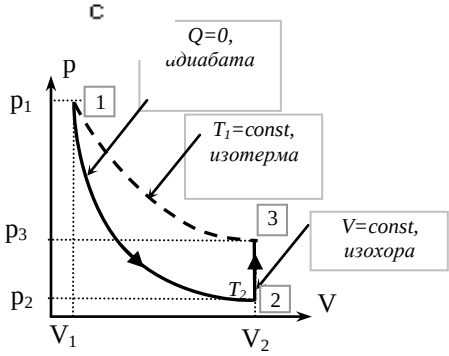


Рис.3

Подставим выражения для P_1 и P_3 и вынесем P_0 за скобки:
$P_0^{\gamma-1}(1+\rho g h_1/P_0)^{\gamma-1} = P_0^{\gamma-1}(1+\rho g h_2/P_0)^{\gamma}$. Величины $\rho g h_1/P_0$, $\rho g h_2/P_0 \ll 1$. Воспользуемся приближенным равенством: при $X \ll 1$ $(1+X)^{\alpha} = 1+\alpha X$. Тогда, после сокращения на P_0 и ρg получим: $(\gamma-1)h_1 = \gamma h_2$. Отсюда получаем расчетную формулу для определения коэффициента

Пуассона: $\boxed{\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}}$, где h_1 – *разность уровней жидкости в манометре после накачки,* h_2 – *разность уровней жидкости в манометре после адиабатного расширения и последующего изохорического нагревания.*

Порядок выполнения лабораторной работы

1. При закрытом кране (рис.1) накачать воздух в баллон до создания разности уровней жидкости в манометре порядка 15-20 см (но не более 20 см).
2. Выждать пока температура воздуха в баллоне сравняется с температурой окружающей среды (перестанет изменяться разность уровней жидкости в манометре). Это происходит за 2-3 минуты.
3. Отсчитать разность уровней жидкости в манометре h_1 (отсчет производить по нижним краям мениска). В имеющемся приборе «0» шкалы манометра расположены посредине. Поэтому удобно отсчитывать опускание левого столба и поднятие столба жидкости в правом колене манометра от «0» и складывать эти величины.
4. Быстро полностью открыть кран до выравнивания давления с атмосферным (уровни жидкости сравняются) и сейчас же закрыть его.
5. Подождав 2-3 минуты, пока температура воздуха в баллоне станет постоянной (давление в колбе перестанет изменяться), отсчитать показание манометра h_2**.**
6. Результаты измерений занести в таблицу, повторив пункты 1-5 не менее восьми раз. 7. Рассчитать среднее значение γ.
8. Сравнить результат опыта с теоретическим значением γ для воздуха.

Контрольные вопросы

1. Что такое число степеней свободы? Сколько степеней свобод у одноатомной, двухатомной и многоатомной молекулы? Какая энергия приходится на одну степень свободы? Чему равна средняя энергия поступательного движения молекулы?
2. Чему равна работа газа в термодинамике? От чего зависит внутренняя энергия газа? Как можно изменить внутреннюю энергию? Запишите и сформулируйте первое начало термодинамики.
3. Что такое теплоемкость тела? Как определить молярную и удельную теплоемкости вещества?
4. Чему равны молярные теплоемкости газа при постоянном объеме и постоянном давлении? Выведите уравнение Майера.
5. Какой процесс называется адиабатным? Запишите уравнение Пуассона. Чему равен показатель адиабаты? Как показатель адиабаты зависит от числа степеней свободы?
6. Чем отличаются графики адиабаты и изотермы?.
7. Запишите первое начало ТД для изотермического, изохорного, изобарного и адиабатного процессов. Как изменяется температура при адиабатном расширении и сжатии?
8. Как изменяется температура, давление и объем газа в процессе проведения лабораторного эксперимента, поясните на графике?.
9. Какими законами связанны различные состояния газа в лабораторном эксперименте?
10. Выведите расчетную формулу для показателя адиабаты в данной лабораторной работе.

Лабораторная работа № 4
«ОПРДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА»

Цель работы: Определить коэффициент внутреннего трения в исследуемой жидкости по измеренной скорости падения шарика в ней.

Приборы и принадлежности: Стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью, микрометр, секундомер, масштабная линейка, свинцовые шарики.

Теория. Явлением *внутреннего трения* ***(вязкостью)*** называется появление сил трения $f_{тр}$ между слоями газа или жидкости, движущимися относительно друг друга параллельно с различными по величине скоростями. Вследствие обмена молекулами за счет их хаотического теплового движения более быстрый слой ускоряет соседний с ним медленный слой, и, наоборот, медленный слой задерживает более быстрый. Силы внутреннего трения направлены по касательным к слоям газа или жидкости.

Скорость беспорядочного теплового движения молекул V в текущем газе (или жидкости) в среднем одинакова во всех точках рассматриваемого пространства, но скорость направленного движения $\vec{U}$ одинакова только для молекул данного слоя газа (или жидкости) и различна для различных слоев. Молекулы, перелетая, благодаря тепловому движению, из более быстрого слоя в медленный, приносят с собой большую, чем в медленном слое, составляющую импульса направленного движения mU_2 и тем самым ускоряют медленный слой. Наоборот, молекулы, попадающие из медленного слоя в более быстрый, имеют меньшую составляющую импульса mU_1, в результате чего они уменьшают скорость более быстрого слоя.

Мысленно выделим в газе площадку ΔS (рис.1), параллельную слоям, текущим с различными скоростями U.

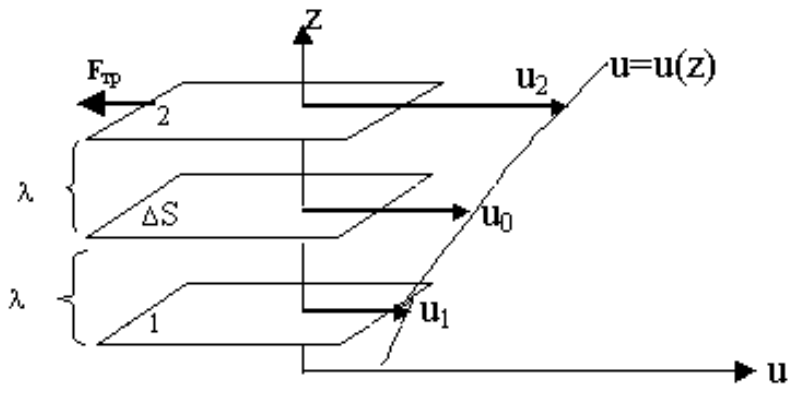


Рис.1. Зависимость скорости течения жидкости от координаты.

Пусть слой *1* лежит под площадкой ΔS на расстоянии средней длины свободного пробега молекул λ. Тогда молекулы, летящие из слоя *1* по направлению к площадке ΔS, достигнут ее без столкновений. Число молекул Δn, пролетающих через площадку ΔS за время Δt из слоя *1*:

$$\Delta n = \frac{1}{6} n_0 \Delta S V \Delta t\,, \qquad (1)$$

где V - средняя скорость теплового движения молекул, n_0 – число молекул в единице объема. Множитель 1/6 учитывает равновероятность движения молекул обоих направлений каждой из координатных осей.

Такое же количество молекул из слоя *2* пересекает площадку ΔS в противоположном направлении. Но, поскольку скорости U_1 и U_2 слоев *1* и *2* различны, то в прямом и обратном направлениях будут перенесены различные импульсы ΔK_1 и ΔK_2 направленного движения:

$$\Delta K_1 = \frac{1}{6} n_0 V \Delta t \Delta S m U_1\,, \qquad (2)$$

$$\Delta K_2 = \frac{1}{6} n_0 V \Delta t \Delta S m U_2\,, \qquad (3)$$

где m- масса молекулы.

В результате этих двух переносов импульса, происходящих в противоположных направлениях, через площадку ΔS будет перенесен от слоя *2* к слою *I* импульс

$$\Delta K = \Delta K_2 - \Delta K_1 = \frac{1}{6} n_0 V \Delta S \Delta t (mU_2 - mU_1). \quad (4)$$

Разность абсолютных величин скоростей U_2 -U_1, можно выразить через градиент скорости U. *Градиент скорости* есть величина, численно равная изменению величины скорости движения слоев на единицу длины в направлении, перпендикулярном поверхности слоя. Для нашего случая градиент скорости равен $\frac{dU}{dZ}$, где $dZ=2\lambda$ (см. рис.1).

Тогда разность U_2-U_1 равна градиенту скорости, умноженному на расстояние между слоями *I* и *2*, т.е. на 2λ.

$$U_2 - U_1 = \left(\frac{dU}{dZ}\right) \cdot 2\lambda, \quad (5)$$

следовательно (4) принимает вид

$$\Delta K = \frac{1}{3} n_0 m \lambda V \left(\frac{dU}{dZ}\right) \lambda. \quad (6)$$

Замечая, что $n_0 m$ есть плотность газа ρ, получим

$$\Delta K = \frac{1}{3} \rho V \lambda \left(\frac{dU}{dZ}\right) \Delta S \cdot \Delta t. \quad (7)$$

Сила внутреннего трения $f_{тр}$ (рис.1), действующая со стороны более медленного слоя *1* на более быстрый слой *2*, согласно второму закону Ньютона равна приращению импульса слоя *2* в единицу времени

$$f_{тр} = \frac{\Delta K}{\Delta t} = \frac{1}{3} \rho V \lambda \left(\frac{dU}{dZ}\right) \Delta S. \quad (8)$$

Введем обозначение

$$\frac{1}{3} \rho V \lambda \left(\frac{dU}{dZ}\right) \Delta S = \eta. \quad (8а)$$

Тогда

$$f_{тр} = \eta \left(\frac{dU}{dZ}\right) \Delta S. \quad (9)$$

Сила внутреннего трения, возникающего при макроскопических движениях в газе или жидкости, прямо пропорциональна градиенту скорости. Коэффициент пропорциональности η носит название коэффициента внутреннего трения, или динамического коэффициента вязкости.

Коэффициент вязкости (или динамическая вязкость) численно равен силе внутреннего трения, действующей на единицу площади границы раздела параллельно движущихся слоев газа или жидкости, когда скорость их движения изменяется на единицу при перемещении на единицу длины в направлении, перпендикулярном к границе раздела.

Закон (9) был получен Ньютоном из анализа экспериментальных данных и явился основой для изучения движения вязкой жидкости и газа.

Коэффициент вязкости зависит от температуры. Кинетическая теория идеального газа дает следующие выражения для входящих в формулу (8а) величин:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma n_0}$$ - средняя длина свободного пробега молекулы,

где n_0 - число молекул в единице объема, σ - эффективное сечение молекулы.

$$V = \sqrt{\frac{3KT}{m}}$$ - средняя квадратичная скорость движения молекулы,

где K - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, m - масса молекулы.

Кроме того, плотность $\rho = mn_0$.

Подставив все эти выражения в (8а), получим

$$\eta = \frac{1}{3}\rho V\lambda = \frac{1}{3}mn_0\sqrt{\frac{3KT}{m}}\cdot\frac{1}{\sqrt{2}\sigma n_0}, \qquad (10)$$

т.е. вязкость идеального газа возрастает с ростом температуры.

В жидкости сила трения между слоями описывается тем же уравнением (9), что и в газе, но коэффициент вязкости уменьшается при повышении температуры. Это объясняется тем, что в отличие от идеального газа между молекулами жидкости имеются значительные силы притяжения. Вследствие этого молекулы жидкости большую часть времени находятся около положений равновесия, и перескок молекулы становится возможным при разрыве межмолекулярной связи. С ростом температуры доля молекул, имеющих связи, уменьшается, в результате чего текучесть жидкости возрастает, а вязкость падает.

Зависимость коэффициента вязкости жидкости от температуры описывается формулой Френкеля

$$\eta = const \cdot e^{\frac{W}{KT}}, \qquad (11)$$

где W– энергия, которую нужно сообщить молекуле жидкости, чтобы она могла перескочить из одного положения равновесия в соседнее. Величина W имеет порядок $(2 \div 3)10^{-20}$Дж, причем $W>0$. Вязкость жидкости обычно во много раз больше, чем у газа. С ростом температуры вязкость жидкости экспоненциально уменьшается, а вязкость пара возрастает пропорционально $\sqrt{T}$, и при критической температуре $T_{кр}$ они становятся одинаковыми (рис. 2).

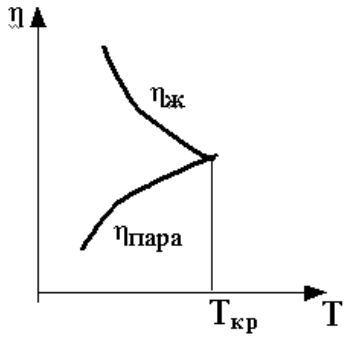


Рис.2.Зависимость коэффициента вязкости от температуры .

Таблица 1

Вязкость некоторых жидкостей при различных температурах

Вещество	Температура, ^{0}C	Вязкость, Н·с·м$^{-2}$
Вода	0	$1{,}19\cdot10^{-3}$
	20	$1{,}05\cdot10^{-3}$
	50	$0{,}55\cdot10^{-3}$
	100	$0{,}28\cdot10^{-3}$
Ртуть	0	$1{,}68\cdot10^{-3}$
	20	$1{,}55\cdot10^{-3}$
	100	$1{,}24\cdot10^{-3}$

Глицерин	0 20 50 100	13,40 12,1 1,49 0,629

Тела, движущиеся в вязкой жидкости или газе, испытывают сопротивление. Сила сопротивления, испытываемая шаром, прямо пропорциональна вязкости газа (жидкости) η, радиусу шара *r* и скорости его движения *V*.

$$f_{тр} = 6\pi\eta rV \ . \qquad (12)$$

Формула (12) носит название закона Стокса и применима лишь для тел достаточно малых размеров и малой скорости движения относительно жидкости. Сила сопротивления движению шара в жидкости возникает из-за сил внутреннего трения при течении слоев жидкости, движущихся вместе с шаром, относительно слоев, остающихся неподвижными. Закон Стокса, как и закон Ньютона для вязкости, применим, если *течение* жидкости *ламинарное,* т.е. такое, при котором каждый выделенный слой скользит параллельно соседним, не перемешиваясь с ними. Ламинарное течение наблюдается при малых скоростях.

При возрастании скорости в жидкости возникает интенсивное вихреобразование и перемешивание. Такое течение называется *турбулентным* или вихревым. В этом случае сила сопротивления становится пропорциональной квадрату скорости.

Характер течения жидкости определяется безразмерным числом Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{r \cdot V \cdot \rho}{\eta} \ , \qquad (13)$$

где *r* - величина, характеризующая линейные размеры тела, обтекаемого жидкостью (газом), *V* - скорость течения, ρ - плотность жидкости (газа), η- динамическая вязкость.

Если при данных условиях число Re превышает определенное критическое значение, то поток становится турбулентным; при значениях Re меньших критического - ламинарным. Таким образом, число Рейнольдса можно использовать в качестве критерия применимости закона Стокса. Для шарика критическим является Re =0,5.

Рассчитаем по формуле (13) число Рейнольдса для движения шарика в глицерине при условии: ρ= 1200 кг/м^3 , *r* =1мм = 10 $^{-3}$м , *V* = 0,2 м/с , η =0,8 кг/м.с

$$\mathrm{Re} = \frac{r \cdot V \cdot \rho}{\eta}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-1} \cdot 1{,}2 \cdot 10^{3}}{8 \cdot 10^{-1}} = 0{,}3$$

Так как число Re оказалось меньше 0,5, то закон Стокса в этих условиях применим.

Подобные условия должны осуществляться в нашем опыте.

Метод измерения

Коэффициент вязкости в работе определяется с помощью наполненного исследуемой жидкостью вертикального стеклянного цилиндра с двумя горизонтальными метками А и A_1, расположенными друг от друг расстоянии *l* (рис. 3). Если в исследуемой жидкости падает шарик небольших размеров, то на него действуют три силы: сила тяжести *mg*, выталкивающая сила $F_{арх}$ и сила сопротивления, обусловленная вязкостью жидкости $f_{тр}$. Силу тяжести можно выразить через плотность шарика ρ и его радиус *r*

$$mg = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g\,. \qquad (14)$$

Выталкивающая сила Архимеда равна

$$F_{apx} = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho_1 \cdot g\,, \qquad (15)$$

где ρ_1 – плотность жидкости.

Сила сопротивления f_{mp} определяется по закону Стокса (12).

Все три силы направлены по вертикали: сила тяжести - вниз, выталкивающая сила и сила сопротивления (трения) - вверх (см. рис. 3).

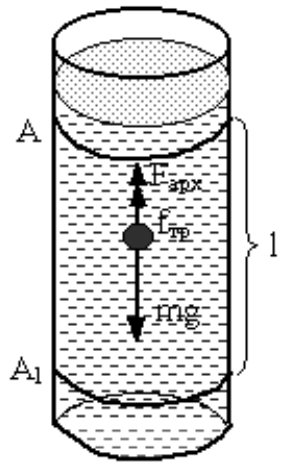


Рис.3. Силы, действующие на шарик, падающий в вязкой жидкости

Пусть в начальный момент времени скорость шарика равна нулю и, следовательно, равна нулю сила трения. Так как сила тяжести больше выталкивающей силы, шарик будет падать ускоренно до тех пор, пока с увеличением скорости сила трения не возрастает настолько, что в сумме с выталкивающей силой станет равной силе тяжести. Равнодействующая трех сил станет равной нулю.

$$P - F_{apx} - f_{mp} = 0 \qquad (16)$$

Шарик при этом начнет двигаться с постоянной скоростью V.

Учитывая (3), (4), (5), получим

$$\frac{4}{3}\pi r^2 \rho g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1 g - 6\pi\eta r V = 0\,. \qquad (17)$$

Решая это уравнение относительно η:

$$\eta = \frac{2}{9} g \text{или} \frac{\rho - \rho_1}{V} \quad \textit{или} \quad \eta = \frac{1}{18}\frac{(\rho - \rho_1)}{l} g D^2 t\,, \qquad (18)$$

где $V = \frac{l}{t}$ скорость установившегося движения; l - расстояние, пройденное шариком; t - время падения шарика; D – диаметр шарика.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установите верхнюю метку на трубке с исследуемой жидкостью на 3-6 см ниже уровня жидкости, чтобы шарик при падении проходил ее с установившейся скоростью. Нижнюю метку установите на расстоянии 3-6 см от дна трубки и измерьте расстояние между метками по масштабной линейке, укрепленной на трубке.
2. Измерьте 3 раза диаметр шарика микрометром и найдите его среднее значение.
3. Опустите шарик в жидкость и секундомером измерьте время прохождения шариком расстояния l между метками.
4. По формуле (18) определите коэффициент вязкости. Вычисления необходимо проводить в системе СИ. Опыт повторите 8 раз, найдите среднее значение $\eta_{ср}$.
5. По методу Стьюдента вычислите ошибку $\Delta\eta$ при $W = 0{,}95$. Все результаты запишите в таблицу 2.

Таблица 2

Реультаты имерений

N	D_1 мм	D_2 мм	D_3 мм	$D_{ср}$ мм	l_i см	t_i с	η_i Н·с/м^2	$\eta_{ср}$ Н·с/м^2	$\Delta\eta_i$ Н·с/м^2	$(\Delta\eta_i)^2$ Н·с/м^2	$\Sigma(\Delta\eta_i)^2$ Н·с/м^2	$\Delta\eta$ Н·с/м^2	$\eta_{ср}\pm\Delta\eta$ Н·с/м^2
1													
…													
8													

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чему равна и как направлена сила внутреннего трения двух слоев жидкости?
2. Каков физический смысл коэффициента вязкости? Размерность его.
3. Объясните возникновение сил внутреннего трения с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Дайте вывод формулы для силы внутреннего трения.
4. Как зависит от температуры коэффициент вязкости для газа и жидкости? Объясните разницу.
5. Запишите формулу Стокса и объясните, при каких условиях ею можно пользоваться.
6. Дайте понятия ламинарного и турбулентного течений.
7. Оцените число Рейнольдса по вашим данным, используя измерения для самого большого и самого маленького шариков и среднее значение найденного коэффициента вязкости.

Лабораторная работа № 5

«ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ»

Цель работы*:* Исследование зависимости сопротивления металлических проводников от температуры в области средних температур (T~ 300 K).

Приборы и принадлежности: 1. Мост Уитстона для измерения сопротивлений. 2. Магазин сопротивлений. 3. Нагреватель. 4. Ртутный термометр.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Согласно закону Ома для участка цепи, ток в цепи прямо пропорционален разности потенциалов на концах участка:

$$I = \frac{1}{R}U . \qquad (1)$$

Коэффициент пропорциональности $1/R$ называется электрической проводимостью участка, а *R*– его электрическим сопротивлением.

Проводимость проводника единичной длины и площади поперечного сечения называется удельной электрической проводимостью σ, а величина, обратная удельной проводимости, – удельным электрическим сопротивлением ρ

$$\rho = 1/\sigma . \qquad (2)$$

Согласно квантовой теории электропроводности металлов, электроны в атомах могут иметь только определенные значения энергии, образующие энергетические уровни. В твердых телах, большинство которых имеют кристалическую структуру, верхние энергетические уровни атомов, находящихся в узлах кристалической решетки, расщепляются, частично перекрываются и образуют так называемые энергетические зоны – области значений энергий, разрешенных для электронов. Энергетические зоны разделены промежутками значений энергии, которыми электроны обладать не могут – запрещенными зонами. Энергетическая зона, соответствующая внешним электронам атомов, находящихся в невозбужденном состоянии, называется валентной зоной. Ближайшую к ней зону возбужденных состояний электронов называют возбужденной зоной или зоной проводимости.

Если валентная зона кристалла заполнена электронами полностью, внешнее электрическое поле не может изменить энергию электронов и возбудить их упорядоченное движение. Такие кристаллы не проводят электрический ток и в зависимости от ширины запрещенной зоны E_q между валентной зоной и зоной проводимости делятся на диэлектрики ($E_q \geq$ 3 эВ) и полупроводники ($E_q \leq$ 1 эВ).

Если электронам валентной зоны сообщить энергию, превышающую ширину запрещенной зоны E_q, они переходят в зону проводимости, приобретают способность обмениваться энергией и принимают участие в электропроводности. Кристаллы, у которых валентная зона заполнена не полностью или перекрывается с зоной проводимости ($E_q = 0$), проводят электрический ток и называются проводниками. Структура энергетических зон разных кристаллов схематически изображена на рис. 1, где точками обозначены электроны.

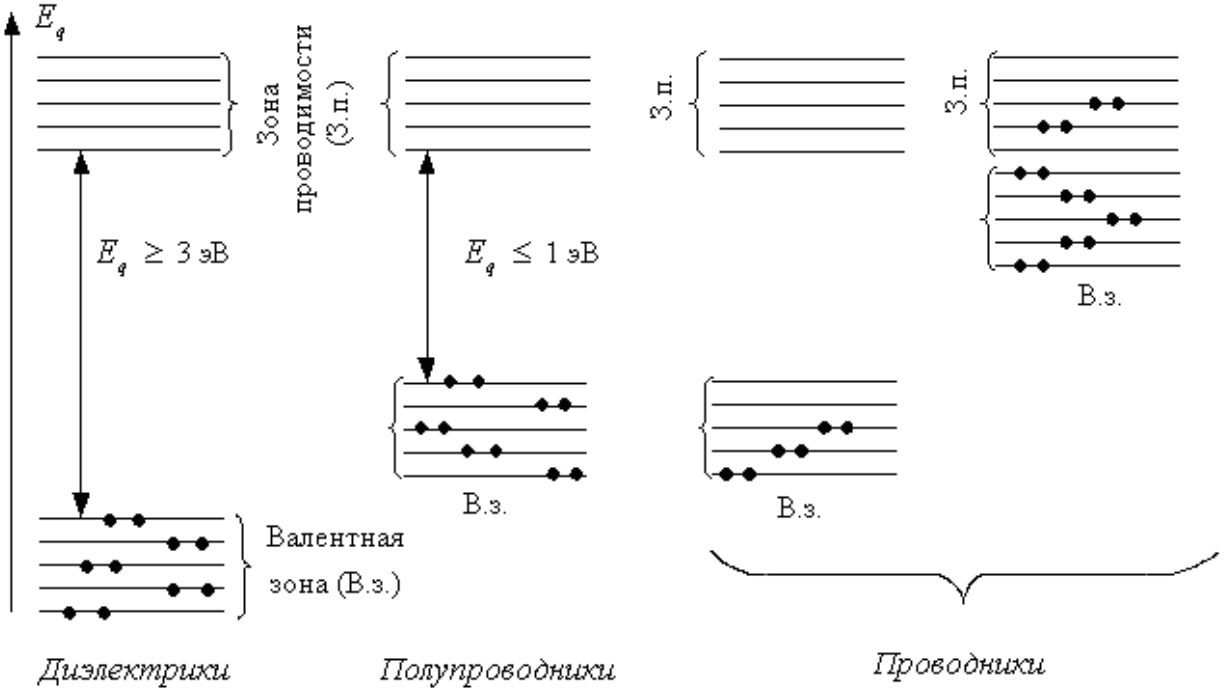


Рис.1

У хороших проводников, металлов, – $\rho=10^{-7}\div10^{-8}$ Ом$^{-1}$м$^{-1}$, у хороших диэлектриков – $\rho=10^{12}\div10^{13}$ Ом$^{-1}$м$^{-1}$, у полупроводников – $\rho=10^{-5}\div10^{8}$ Ом$^{-1}$м^{1} и сильно зависит от температуры.

Электроны зоны проводимости участвуют в тепловом хаотическом движении. Элементарная классическая теория электропроводности металлов рассматривает свободные электроны, движущиеся между узлами кристаллической решетки как своеобразный электронный газ, обладающий свойствами идеального газа. Объемное электрическое сопротивление металлов по этой теории объясняется соударениями электронов с ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки. Увеличение амплитуды колебаний узлов решетки при повышении температуры рассматривается в качестве причины возрастания электрического сопротивления проводников при их нагревании. Согласно электронной теории проводимости сопротивление металлов R должно возрастать пропорционально $\sqrt{T}$, что противоречит опытным данным, согласно которым $R\sim T$.

Указанное расхождение теории с практикой объясняется тем, что движение электронов в металлах не подчиняется законам классической механики, а происходит по законам квантовой механики, учитывающей волновые свойства электронов в металлах. Квантовая теория электропроводности металлов объясняет возникновение электрического сопротивления рассеянием волн, описывающих движение электронов на неоднородностях – дефектах кристаллической решетки. Тепловые колебания узлов решетки также являются по существу нарушениями её периодической структуры, т.е. дефектами. Рассеяние электронов на колеблющихся узлах решётки и обусловливает сопротивление проводников при средних и высоких температурах.

В проводниках в процессе электропроводности принимают участие только те электроны, которые находятся на самых верхних заполненных уровнях зоны проводимости. Их энергия ε во много раз превосходит энергию теплового движения $\varepsilon_T=3/2kT$, и средняя скорость $\vec{v}$ этих электронов практически не зависит от температуры. При средних и высоких температурах

концентрация и среднее число столкновений электронов проводимости также не зависят от температуры. Температурная зависимость удельной проводимости проводников в этом диапазоне температур определяется главным образом температурной зависимостью длины свободного пробега носителей тока $\bar{\lambda}$:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n_a}, \qquad (3)$$

где d – эффективный диаметр атомов в узлах кристаллической решетки, n_a –их концентрация.

Эффективный диаметр атома – это размер области в окрестности узла решетки, попав в которую электрон может испытать столкновение с атомом и рассеяться. Этот размер примерно равен удвоенной амплитуде колебаний атомов относительно положения равновесия. Так как квадрат амплитуды тепловых колебаний атомов A^2 пропорционален энергии колебаний

$$A^2 \sim \varepsilon_T \sim k\,T,$$

то эффективный диаметр атомов d пропорционален $\sqrt{T}$

$$d \sim \sqrt{T},$$

а средняя длина свободного пробега электронов $\bar{\lambda}$ согласно (3) пропорциональна T^{-1}

$$\bar{\lambda} \sim T^{-1}.$$

Принимая во внимание (3), для удельной проводимости получим:

$$\left.\sigma \sim T^{-1}\right\} \qquad (4) \qquad \rho \sim T.$$

Таким образом, сопротивление металлических проводников при увеличении температуры возрастает по линейному закону. Если температура отсчитывается по шкале Цельсия, то можно записать:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \qquad (5)$$

где R_t – сопротивление проводника при температуре $t°$ С,

R_0 – сопротивление проводника при $t = 0°$ С,

α – температурный коэффициент сопротивления.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение сопротивления производится методом моста постоянного тока (моста Уитстона). Этот метод отличается высокой точностью и часто применяется в лабораторной практике. Принципиальная схема моста приведена на рис. 2.

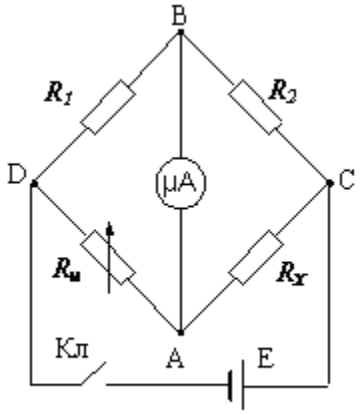


Рис. 2

Если замкнуть ключ Кл, то по всем сопротивлениям проходит электрический ток. Но при выполнении условия $R_1R_x=R_мR_2$ ток через микроамперметр не протекает, и говорят, что мост сбалансирован. Это соотношение можно записать в виде:

$$R_x=R_м\,(R_2/R_1) \qquad (10)$$

Подбором сопротивления $R_м$ можно сбалансировать мост, и, если известно отношение R_2 / R_1, с помощью соотношения (10) можно найти неизвестное сопротивление R_x. В качестве плеча $R_м$ используется магазин сопротивлений. При определения отношения плеч $K = R_2 / R_1$, вместо R_x к мосту подключают известное сопротивление R и добиваются баланса моста. K определяется из соотношения:

$$K = R_2 / R_1 = R / R_м. \qquad (11)$$

Нагревание исследуемых сопротивлений осуществляется в печи, питаемой переменным током; температура сопротивлений определяется с помощью термометра.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Определение отношения плеч $K = R_2 / R_1$

1.Изучив внимательно схему, подключить к клеммам R_x моста эталонное сопротивление R=100 Ом, а к клеммам $R_м$ – магазин сопротивлений.

2. Вращая ручки магазина, установить первоначальное сопротивление $R_м$= 200 Ом.

3. Подключить установку к электросети тумблером питания моста М на панели установки. Нажать кнопку Кл и, вращая ручку магазина сопротивлений, добиться установки стрелки микроамперметра на нуль, что соответствует балансу моста.

При большом разбалансе моста стрелка микроамперметра отклоняется резко и может переломиться, поэтому первое нажатие на кнопку Кл производить на максимально короткое время.

4. Вычислить отношение плеч $K = R / R_м$, где $R_м$ – сопротивление магазина, соответствующее балансу моста.

5. Повторить измерения 4-5 раз и найти среднее значение величины $K = K_{ср}$.

Задание 2. Исследование зависимости сопротивления металлического проводника от температуры.

1.Подключить к клеммам R_x моста исследуемое металлическое сопротивление, находящееся внутри нагревателя. Переключатель рода работ на панели установки поставить в положение “Проводник”.

2. Установить на магазине ориентировочное сопротивление $R_м$ =60 Ом.

3.Сбалансировать мост вращением ручек магазина. С помощью соотношения (11) вычислить величину исследумого сопротивления и записать в таблицу 2. Измерить температуру сопротивления с помощью ртутного термометра.

4. Включить тумблер *«Печь»* питания печи, довести температуру печи до 30° С и измерить величину исследуемого сопротивления. Результаты записать в таблицу 2.

5. Измерять величину исследуемого сопротивления через каждые 10° С. Нагрев вести до 100° С. В момент измерения сопротивления печь следует отключать. Результаты измерений записать в табл. 1.

Таблица 1

t, °С	$t_{ком}$	30	40	50	60	70	80	90	100
$R_м$, Ом									
R_x, Ом									

6. Выключить мост из сети.

7. Построить график зависимости $R_x=f(t)$ на миллиметровой бумаге.

8. Экстраполируя полученную прямую до значения t = 0° С, определить значение R_o в соотношении (5). Вычислить температурный коэффициент α как тангенс угла наклона прямой $R_x= f(t)$: $\alpha = \Delta R / R_o t_{max}$, где $\Delta R = R_{max} - R_0$ – разность сопротивлений при максимально высокой температуре и при t = 0° С, а t_{max} – максимальная температура до которой был нагрет проводник.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

- Мост Уитстона включается в сеть 220 в.
- Соблюдайте осторожность при работе. Избегайте контактов в местах касаний токоведущих проводов с элементами схемы.
- В случае неисправностей вызывайте лаборанта.
- После выполнения работы приборы отключить от сети.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое электрическое сопротивление, удельная проводимость проводника?
2. Чем определяется деление твердых тел на проводники, полупроводники и диэлектрики в зонной теории твердых тел?
3. Как зависят сопротивления металлических проводников и полупроводников от температуры?

4. Чем обусловлено различие зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры?
5. Расскажите о методике измерения сопротивлений в данной работе.

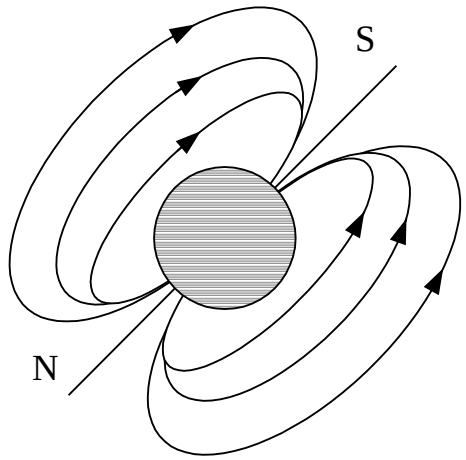
Лабораторная работа № 6
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ»

Цель работы: определить горизонтальную составляющую магнитного поля Земли с помощью тангенс- буссоли

Приборы и принадлежности: тангенс-буссоль, амперметр, реостат, переключатель, источник постоянного тока.

Теория: как известно, Земля является гигантским магнитом. Магнитный момент Земли равен $8\cdot10^{22}$ А·м^2. Чтобы создать такое поле, необходимо было бы по проводнику, уложенному по экватору Земли, пропустить ток 10^9 А. Природа земного магнетизма окончательно не выяснена. Предполагается, что магнитное поле создается потоками заряженных частиц вблизи границы земного ядра, возникающими за счет внутреннего тепла Земли, а также за счет приливных явлений в земной коре под действием притяжения Луны.

Магнитное поле Земли может быть обнаружено, например, с помощью магнитной стрелки (компаса). Силовые поля Земли изображены на рис. 1.



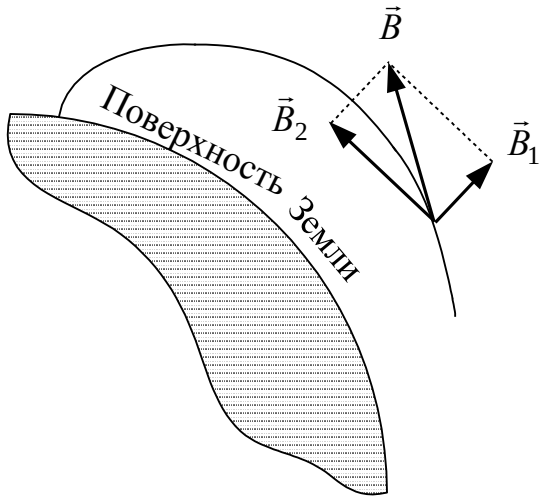


Рис.1 Рис.2

Фактически, везде над поверхностью Земли, вектор индукции магнитного поля $\vec{B}$ направлен под некоторым углом к поверхности и может быть разложен на вертикальную $\vec{B}_1$ и горизонтальную $\vec{B}_2$ составляющие (рис. 2). Определение горизонтальной составляющей $\vec{B}_2$ и составляет цель данной работы.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли производится по отклонению магнитной стрелки, установленной на острие иглы и расположенной в горизонтальной плоскости. При помещении в магнитное поле стрелка устанавливается вдоль направления вектора магнитной индукции. В частности, в магнитном поле Земли стрелка ориентируется по горизонтальной составляющей индукции поля. Если в том месте, где находится стрелка, создать дополнительное магнитное поле известной величины $\vec{B}_0$, направленное перпендикулярно магнитному полю Земли, магнитная стрелка повернется и установится вдоль вектора результирующего поля $\vec{B}_{\text{р}}$, равного векторной сумме $\vec{B}_2$ и $\vec{B}_0$ (рис. 3).

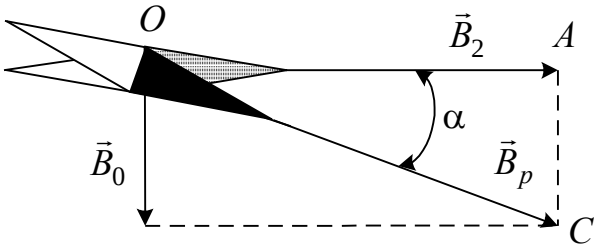


Рис. 3

Измерив угол α, на который отклоняется стрелка от первоначального положения при включении поля $\vec{B}_0$, и учитывая, что треугольник *OAC* прямоугольный, легко вычислить величину горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли $\vec{B}_2$:

$$B_2 = \frac{B_0}{\operatorname{tg}\alpha}. \qquad (1)$$

Создание дополнительного поля $\vec{B}_0$ и измерение угла отклонения стрелки α производится с помощью тангенс-буссоли. Тангенс-буссоль – это прибор, состоящий из круга, на который намотано несколько витков изолированной проволоки. Круг установлен на подставке в вертикальном положении. В центре круга в горизонтальной плоскости закреплен компас со стрелкой, на которую сверху наклеен алюминиевый круг (лимб) с делениями от 0° до 360°. Стрелка под кругом расположена так, что ее северный конец совпадает с делением 0° лимба, а южный – с делением 180°. Стрелка с лимбом может свободно вращаться внутри круглой коробки. С одной стороны коробки прикреплена призма полного внутреннего отражения и лупа, через которые можно наблюдать деления лимба; на диаметрально противоположной стороне коробки укреплена стойка с тонкой проволокой, выполняющей роль визира.

Плоскость витков катушки перпендикулярна направлению щель–визир. Если развернуть тангенс-буссоль так, чтобы против визира установилось деление лимба 90° или 270°, то магнитная стрелка, а следовательно, и вектор индукции магнитного поля Земли будут находиться в плоскости витков, совпадающей с плоскостью магнитного меридиана Земли.

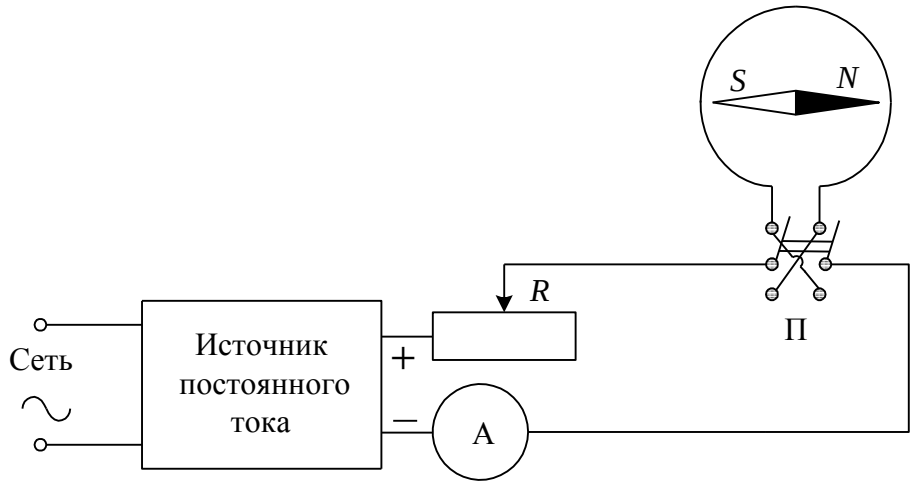


Рис. 4

На рис. 4 показана электрическая схема установки. При замыкании переключателя П по виткам прибора протекает постоянный ток, величина которого регулируется реостатом *R* и измеряется амперметром А. В центре тангенс-буссоли (там, где находится магнитная стрелка) ток создает магнитное поле, индукция $\vec{B}_0$ которого направлена перпендикулярно плоскости витков и определяется по формуле:

$$B_0 = \mu_0 \cdot \frac{n \cdot I}{2 \cdot r}, \qquad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м – магнитная постоянная; *n* – число витков; *I* – сила тока, А; *r* – радиус круга, м.

При включении тока стрелка отклоняется и устанавливается в направлении результирующей $\vec{B}_p$. Определив угол отклонения стрелки по лимбу, можно рассчитать значение горизонтальной составляющей $\vec{B}_2$ индукции магнитного поля Земли:

$$B_2 = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I}{2 \cdot r \cdot \mathrm{tg}\,\alpha}. \qquad (3)$$

Отношение

$$\frac{I}{\mathrm{tg}\,\alpha} = \frac{2 \cdot r \cdot B_2}{\mu_0 \cdot n} = C \qquad (4)$$

называется постоянной тангенс-буссоли. Значение B_2 может быть выражено через параметры катушки и постоянную *C*:

$$B_2 = \frac{\mu_0 \cdot n}{2 \cdot r} \cdot C. \qquad (5)$$

Чтобы исключить ошибку измерения угла α, связанную с неточностью установки плоскости витков в плоскости магнитного меридиана Земли, измерения проводят для двух противоположных направлений $\vec{B}_0$. Для этого с помощью переключателя П меняют направление тока в витках при неизменной силе тока *I*. Так как $\vec{B}_0$ при этом изменяется только по направлению, углы отклонения α_{i1} и α_{i2} должны быть одинаковы по величине и

противоположны по знаку: $\alpha_{i1} = -\alpha_{i2}$. Если тангенс-буссоль установлена с малой ошибкой Δα, то при снятии отсчета будем иметь:

$$|\alpha_1| = |\alpha_{i1}| + \Delta\alpha,$$
$$|\alpha_2| = |\alpha_{i2}| - \Delta\alpha.$$

Тогда при вычислении среднего значения угла отклонения ошибка установки Δα автоматически исключается:

$$|\alpha_{i1}| = \frac{|\alpha_1| + |\alpha_2|}{2} = \frac{|\alpha_{i1}| + \Delta\alpha + |\alpha_{i2}| - \Delta\alpha}{2} = |\alpha_{i2}|. \qquad (6)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установить тангенс-буссоль так, чтобы плоскость витков совпала с плоскостью меридиана магнитного поля Земли. Для этого нить визира совмещается с делением 90° или 270° лимба.

Амперметр и источник тока должны отстоять от буссоли не менее чем на 1 м. Это делается для уменьшения влияния посторонних магнитных полей на точность измерения.

2. Проверить правильность сборки схемы в соответствии с рис. 4.

3. Включить источник тока в сеть.

4. Установить заданное преподавателем начальное значение силы тока реостатом *R* и снять отсчет угла по лимбу. Затем, не меняя силы тока, переключателем П изменить его направление и повторить отсчет.

Вычислить углы отклонения стрелки от первоначального положения α_1 и α_2, абсолютные значения углов отклонения $|\alpha_1|$ и $|\alpha_2|$ записать в таблицу.

Опыт повторить 5–7 раз при разных значениях силы тока *I*. Шаг изменения силы тока задается преподавателем. Максимальное значение тока должно быть таким, чтобы угол отклонения не превышал 60°.

Примечание. С целью уменьшения резких колебаний стрелки с лимбом, возникающих при изменении направления тока в витках буссоли, можно провести последовательно измерения углов отклонения стрелки при всех заданных значениях силы тока, сначала при одном, а затем при другом направлении тока. Одинаковые значения силы тока при двух различных положениях переключателя П (разных направлениях тока) выставляются с помощью реостата *R* при условии, что на шкале амперметра положения стрелки совпадают с ее зеркальным изображением для всех задаваемых значений тока (смотреть на стрелку амперметра нужно в строго вертикальном направлении сверху вниз).

Таблица

№ п/п	Сила тока *I*, А	Угол отклонения		Средний угол отклонения		Постоянная тангенс-буссоли С, А	B_{2i}, Тл	ΔB_{2i}, Тл	$(\Delta B_{2i})^2$, Тл^2
		$\lvert\alpha_1\rvert_i$	$\lvert\alpha_2\rvert_i$	$\lvert\alpha_i\rvert$	$\mathrm{tg}\lvert\alpha\rvert_i$				
1									
2									
. .									

7									

5. Используя соотношения (4), (5) и значения $|\alpha_i|$ вычислить для каждого опыта постоянную тангенс-буссоли С и горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли B_{2i}.

Значения числа витков *n* и радиуса круга *r* указаны на тангенс-буссоли.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м = $12{,}57 \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Результаты вычислений записать в таблицу.

6. Найти среднее значение $B_{2ср}$ и вычислить абсолютную погрешность измерения по методу Стьюдента:

$\Delta B_2 = \alpha S$, где $S = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{m} \Delta B_{2i}^2}{m(m-1)}}$, число измерений m = 7, доверительная вероятность W = 0,9

7. Результат записать в виде $B_2 = B_{2\text{ср}} \pm \Delta B_2$.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

- Установка включаются в сеть 220 В.
- Соблюдайте осторожность при работе. Избегайте контактов в местах касаний токоведущих проводов с элементами схемы.
- В случае неисправностей вызывайте лаборанта.
- После выполнения работы установку отключить от сети.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

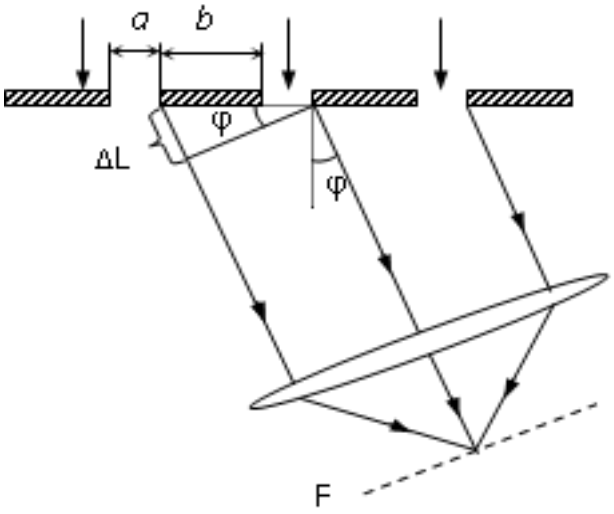
1. Какими явлениями можно объяснить природу земного магнетизма?
2. Запишите закон Био-Савара-Лапласа и формулу для расчета величины индукции магнитного поля в центре кругового витка с током.
3. Опишите устройство тангенс-буссоли. Что такое постоянная тангенс-буссоли?
4. Объясните методику измерения индукции магнитных полей с помощью тангенс-буссоли.
5. Зачем опыт проводится при разных направлениях тока в витках буссоли?

Лабораторная работа № 7
«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ»

Цель работы: измерение длины световой волны с помощью прозрачной дифракционной решётки.

Теория. Интерференция света – это явление сложения световых колебаний с последующим формированием интерференционной картины (чередование минимумов и максимумов интенсивности). Когерентными называют две электромагнитные волны одинаковой частоты, если

разность их фаз не зависит от времени. Когерентные колебания – это колебания с одинаковой частотой и постоянной во времени разностью фаз. Длина волны – это расстояние между ближайшими друг к другу точками, колеблющимися в одинаковых фазах. $[\lambda] = м$



Дифракция- явление отклонения света от прямолинейного распространения при прохождении вблизи препятствий. Дифракционная решётка – это прозрачная пластина с нанесёнными параллельными непрозрачными штрихами равной ширины b (рис. 1). Между штрихами возникают одинаковые прозрачные промежутки – прямоугольные щели шириной a. Величина d = a + b называется постоянной (периодом) решётки. Дифракционная решётка осуществляет наложение двух процессов: дифракции на каждой отдельной щели и интерференции излучения от всех щелей. Значительное усиление волн будет происходить только под теми углами φ, для которых световые волны, идущие от всех щелей, усиливают друг друга. Это взаимное усиление будет осуществляться, если оптическая разность хода лучей от соседних щелей ΔL кратна длине световой волны. Из рис.1 видно, что $\Delta L = d \sin \varphi$

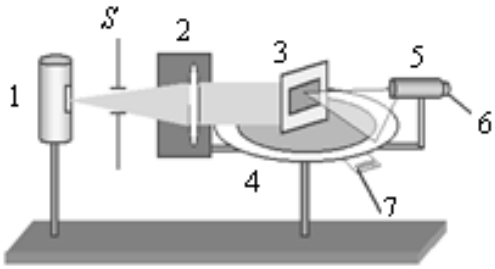
Выражение носит название **<u>основного соотношения дифракционной решётки</u>** в случае нормального падения света. Оно даёт углы, под которыми наблюдаются максимумы для всех имеющихся в излучении длин волн в каждом порядке k (k - порядок дифракции).

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

Схема хода лучей:

Рисунок 1. Схема хода лучей.

Рисунок 2. Схема установки.



1 – ртутная лампа: 2 – коллиматор; 3 – дифракционная решетка: 4 – гониометр; 5 – зрительная труба; 6 – окуляр; S– входная щель.

Основные расчётные формулы:

1. Период дифракции: $d = \frac{1}{N}$; $[d]$ = м, N – число штрихов на единицу длины , $[N] = \frac{1}{м}$

2. Длина волны: $\lambda = \frac{d \cdot sin\,\varphi}{k}$; $[\lambda]$=м, d – постоянная (период) дифракционной решетки, м; k–порядок дифракции (k=0;±1;±2;…).

$$\lambda_{ср} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3}$$

3. Удвоенный угол дифракции: $2\varphi = |\varphi_{-k} - \varphi_{+k}|$

4. Угол дифракции: $\varphi = \frac{2\varphi}{2}$

Погрешности прямых измерений: $\Delta(\varphi) = 0°1'$, $\Delta d = 1 \cdot 10^{-6}$м

Погрешности косвенных измерений:

1. Относительная погрешность косвенных измерений длины волны

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\bar{\lambda}} = \left|\frac{\Delta d}{d}\right| + \left|\sqrt{\frac{1}{sin^2\,\varphi} - 1} \cdot \Delta\varphi\right|$$

2. Абсолютная погрешность косвенных измерений длины волны

$$\Delta\square = \bar{\square}\varepsilon$$

Порядок выполнения работы

1. Прежде чем включить источник исследуемого излучения, произвести пробный отсчет по шкалам спектрогониометра. Затем включают ртутную лампу и устанавливают ее напротив входной щели коллиматора. Дифракционная решетка ставится перпендикулярно к направлению пучка света.
2. Далее поворачивают алидаду грубо от руки (винт 12 отжат) до тех пор, пока визирная линия зрительной трубы не будет наведена на центральный максимум. Пользуясь микрометрическим винтом 2 и маховичками 7 и 8, получают четкое и узкое изображение коллиматорной щели. Поворачивая алидаду от руки (винт 12 разжат) влево и вправо от нулевого максимума, просматривают весь спектр и находят нужные спектральные линии в спектре первого порядка. После этого приступают к измерениям.
3 Повернув алидаду влево (винт 12 отжат), находят нужную (рис. 8) спектральную линию и совмещают ее с визиром.
4. Зажав стопорный винт 12, производят с помощью винта 11 более точное совмещение визира со спектральной линией и делают отсчет угла α 1 по шкалам окуляра микроскопа.
5. После этого, вращая алидаду от руки (винт 12 отжат),переводят зрительную трубу вправо, наводя ее на такую же линию в правом спектре. Зажав винт 12, винтом 11 производят точную настройку визира на эту линию и делают отсчет угла α_2.

Измерения проводятся для линий спектра первого порядка.
Результаты измерений занести в Таблицу 1.

Таблица 1

Цвет спектральной линии	**K (порядок)**	**Номер измерения**	φ_{-k}	φ_k	2φ	$\Delta(2\varphi)$	φ	$\sin\varphi$	$\lambda\cdot10^{-4}$
			град.	**град.**	**град.**	**град.**	**град.**		**мм**
фиолетовый	1	1							
		2							
		3							
	2	1							
		2							
		3							
	3								

Таблица 2

Цвет спектральнй линии	**K (порядок)**	**Номер измерения**	φ_{-k}	φ_k	2φ	$\Delta(2\varphi)$	φ	$\sin\varphi$	$\lambda\cdot10^{-4}$
			град.	**град.**	**град.**	**град.**	**град.**		**мм**
зелёный	1	1							
		2							
		3							
	2	1							
		2							
		3							
	3	1							
		2							
		3							

Таблица 3

Цвет спектрально й линии	K (порядок)	Номер измерения	φ_{-k}	φ_k	2φ	$\Delta(2\varphi)$	φ	$\sin\varphi$	$\lambda\cdot10^{-4}$
			град.	град.	град.	град.	град.		мм
жёлтый	1	1							
		2							
		3							
	2	1							
		2							
		3							
	3	1							
		2							
		3							

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 В чем состоит явление дифракции света?

2 Сформулируйте принцип Гюйгенса–Френеля.

3 Что такое разрешающая способность R дифракционной решетки и от чего она зависит?

4 Какой вид имеет дифракционная картина, полученная от прозрачной решетки?

5.Какой цвет обеспечивает наилучшую разрешающую способность дифракционной решетки?

6. Сколько штрихов должна иметь дифракционная решетка длиной L = 1 см, если спектр второго порядка отсутствует в видимой области? (Длины волн видимого спектра от 390 до 788 нм).

Лабораторная работа № 8

«ИЗУЧЕНИЕ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СВЕТОВОГО ПОЛЯ ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ»

Цель работы: ознакомление с основами фотометрирования, исследование светового поля лампы накаливания.

Приборы и принадлежности: оптическая скамья, фотометр Луммера-Бродхуна, электролампа известной силы света на неподвижном штативе, электролампа неизвестной силы света на неподвижномштативе, электролампа на вращающемся штативе с лимбом.

1. Вопросы для подготовки к работе

1. Основные фотометрические характеристики точечных источни-ков света: световой поток, сила света (определение и единицыизмерения).
2. Освещённость поверхности (определение и единицы измерения).
3. Связь между освещённостью поверхности, силой света точеч- ного источника и расстоянием от источника до освещаемой по-верхности.
4. Фотометры, их назначение и принцип действия. Устройство фо-тометра Луммера-Бродхуна.
5. Рабочая формула, измерение входящих в неё величин.

2. Краткая теория

Поток энергии, излучаемый источником, вызывает у человека зри- тельные ощущения. Интенсивность ощущения зависит от степени чув- ствительности глаза к различным длинам волны. Поток, в состав

которого входят инфракрасные или ультрафиолетовые лучи, не вызывает зрительных ощущений, даже если мощность его велика. Наоборот, поток, состоящий из лучей, к которым глаз наиболее чувствителен, вызывает при малой мощности значительные зрительные ощущения.

Для характеристики интенсивности света с учетом его способности вызывать зрительное ощущение вводится величина Ф, называемая световым потоком.

Световой поток — это поток энергии, излучаемый источником и оцениваемый по зри- тельному ощущению. Единица измерения светового потока — люмен (лм).

Раздел оптики, занимающийся измерением световых потоков и величин, связанных с такими потоками, называется ***фотометрией***.

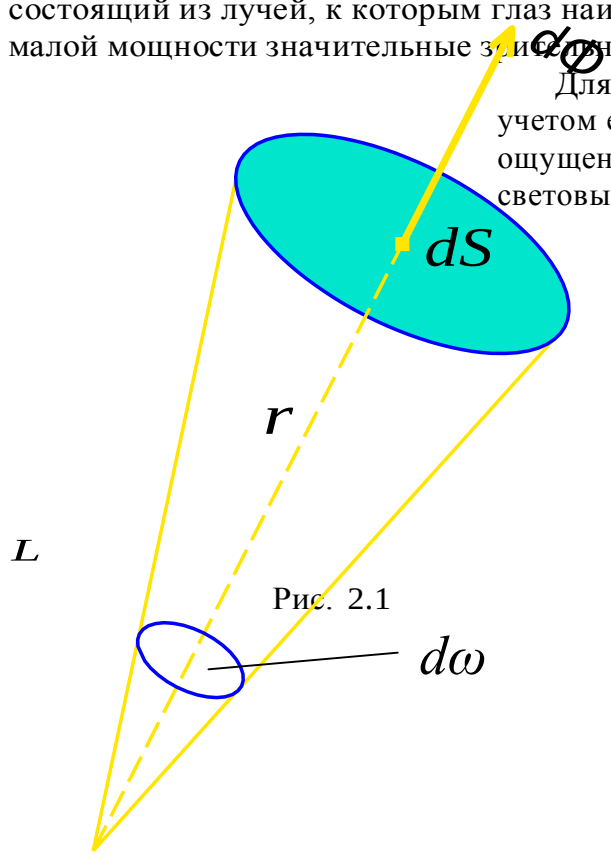


Рис. 2.1

Силой света J источника называется световой поток, излучаемый в единицу телесного угла. Это пространственная плотность светового потока:

$$J = \frac{d\Phi}{d\omega},$$

где $d\Phi$ — световой поток сквозь элементарную площадку (рис. 2.1);

$d\omega$ — элементарный телесный угол, в котором распространяется этот поток:

$$d\omega = \frac{dS}{r^2}.$$

Сила света измеряется в канделах (кд).

Для протяжённых источников вводится понятие светимости ис-точника.

Светимость R источника — это поток, излучаемый единицей по-верхности источника по всем направлениям:

$$R = \frac{d\Phi}{dS},$$

где dS — излучающая поверхность. Светимость измеряется в (лм/м^2).

Для характеристики излучения источника в данном направлении вво- дится понятие яркости источника.

Яркость B источника — это сила света, излучаемая видимой поверхностью источника в на-правлении наблюдения:

$$B = \frac{d\Phi}{dS_\phi d\omega} = \frac{dJ}{dS_\phi},$$

где $dS_\phi = dS \cos\phi$ — проекция излучаемой поверхности на направление наблюдения (рис. 2.2).

Яркость измеряется в кд/м^2.

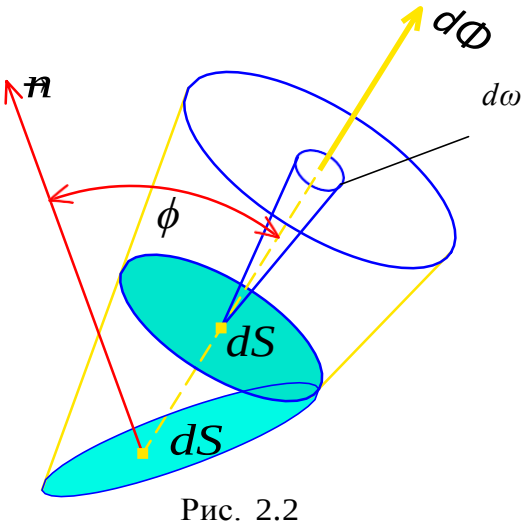


Рис. 2.2

Если B не зависит от на правления излучения, то такие источники называются косинусными или ламбертовскими (т.е. подчиняющими закону Ламберта). Для таких излучателей: $R = \pi B$. (Вывод формулы сделать самостоятельно).

Большинство тел не являются источниками света, но мы их видим потому, что они отражают падающий на них свет от других источников. Поэтому при решении многих задач важно знать, какое количество светового потока падает на освещаемую поверхность. Для этого вводится величина E, называемая освещённостью поверхности.

Освещенность — это световой поток, отнесённый к единице площади освещаемой поверхности:

$$E = \frac{d\Phi}{dS},$$

где $d\Phi$ — световой поток, падающий на поверхность dS. Освещённость измеряется в люксах (лк).

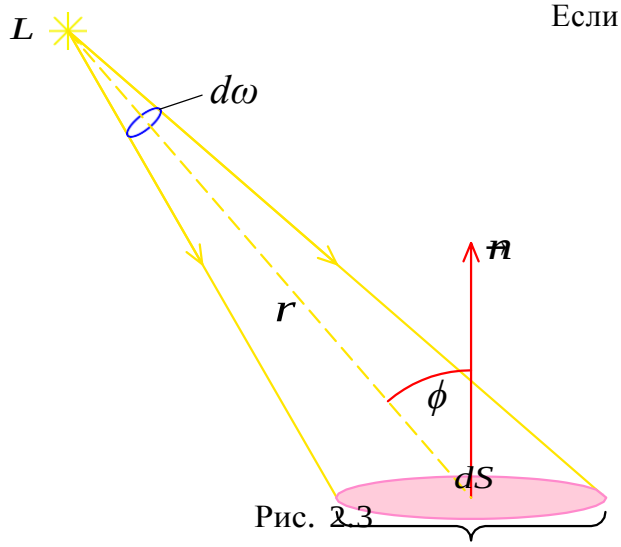


Рис. 2.3

Если источник света точечный, то освещённость можно выразить через J — силу света источника и r — расстояние от источника до освещаемой поверхности (рис. 2.3):

$$E = \frac{J}{r^2}\cos\phi\,,$$

где ϕ — угол между нормалью к поверхности и направлением падения лучей. (Выводы формулы сделать самостоятельно). Эта зависимость используется для определения силы света неизвестного источника путём сравнения его с силой света известного (эталонного) источника.

Если освещать поверхность различными источниками L_1 и L_2 с силой света J_1 и J_2 и добиться равенства освещенностей $E_1 = E_2$, то

при $\phi_1 = \phi_2$ или $\phi_1 = \phi_2 = 0$, *откуда*

$$\frac{J_1}{r_1^2} = \frac{J_2}{r_2^2} \rightarrow J_2 = \frac{r_2^2}{r_1^2} J_1$$

Такой метод определения силы света источника называется фотометрированием, а приборы, служащие для определения силы света неизвестного источника путём сравнения о известным, называются **фотометрами**.

2. Описание установки

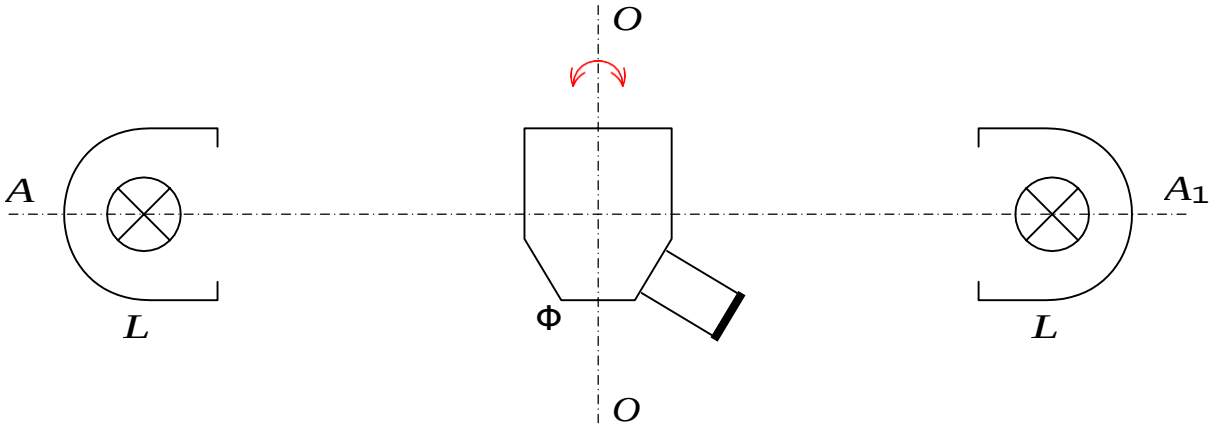
На оптической скамье размещены лампы L_1; L_2 и фотометр Ф (рис. 3.1).

3. *Описание установки*Рис. 3.1

В нашей работе используется фотометр Луммера-Бродхуна. Он может вращаться вокруг горизонтальной оси OO_1. На оси AA_1, пер- пендикулярной оси OO_1, находятся эталонная L_1 и исследуемая L_2 электролампы, которые, как и фотометр, могут перемещаться вдольоптической скамьи.

Рис. 3.1

Рассмотрим устройство фотометра и принцип его работы (рис. 3.2, вид сверху).



Основные части фотометра: закрытая камера с двумя окнами в противоположных стенках, матовая рассеивающая пластинка P , два зеркала S_1 и S_2, Фотометрический кубик Луммера Q. Для наблюде- ния фотометрического поля служит труба T.

Свет от сравниваемых источников попадает на белую матовую пластинку P и диффузно рассеивается по всем направлениям. Из множества лучей выберем параллельные и, с целью упрощения схемы, рассмотрим только их. После матовой пластинки эти лучи отражаются от зеркал S_1 и S_2 и попадают на кубик Луммера.

Кубик Q представляет собой две прямоугольные призмы. Гипотенузная грань правой призмы плоская, гипотенузная грань левой призмы представляет собой часть сферы. Сферическая грань призмы частично отшлифована так, что образуется плоский круг *aa*, которым она прижимается к правой призме до оптического контакта.

В зрительную трубу T попадает свет от источника L_1, прошедший через площадку оптического контакта, а также от источника L_2, после отражения от участков *a A* и *a B* кубика. Таким образом, наблюдаемое в трубу поле имеет вид,

изображённый на рисунке 3.3. Внутренний круг воспроизводит освещённость, которая получается

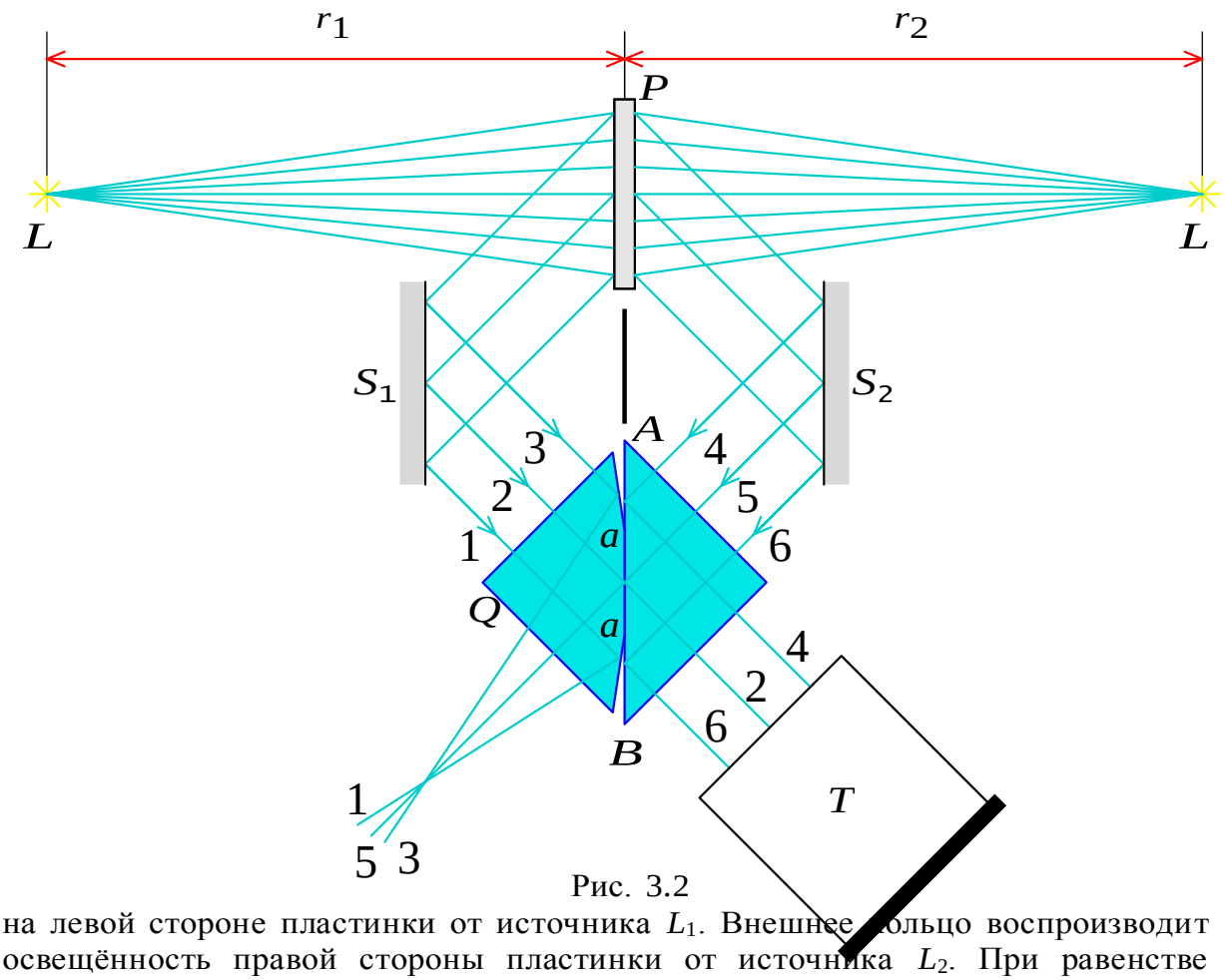
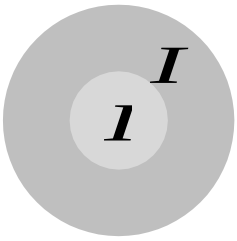


Рис. 3.2

на левой стороне пластинки от источника L_1. Внешнее кольцо воспроизводит освещённость правой стороны пластинки от источника L_2. При равенстве освещённостей видимая грань между внутренним и наружным полями исчезает.



Измерив расстояние r_1 и r_2 от пластинки до источников L_1 и L_2, можно определить силу света ис- следуемого источника по формуле (2.1). Равенствоосвещённостей устанавливается визуально. Это основано на свойстве глаза определять одинаковостьосвещённости двух соседних полей с большой степенью точности, при условии, что спектральный состав источников освещения одинаков.

4. Порядок выполнения работы

Задание 1. Знакомство с описанием и конструкцией экспериментальной установки.

Задание 2. Определение силы света лампы накаливания.

На крайних рейтерах скамьи расположите исследуемую и эталонную лампы, а между ними фотометр (рис. 3.1). При этом условии установите систему так, чтобы свет падал на пластинку *P* нормаль- но.

Передвигая фотометр в ту или другую сторону, добейтесь одинаковой освещённости поля зрения. При этом надо иметь в виду, что при сравнении ламп различных типов, а также одинаковых, но раз- лично накалённых, появляется различие в окраске излучаемого ими света. Это связано с различиями спектрального состава излучения. В таких случаях установку на равенство освещённости делают приближённо. После указанной установки определите по скамье расстояния r'_1 и r'_2 от обоих источников до фотометра. Затем, не меняя поло жения источников, поверните фотометр вокруг горизонтальной оси OO_1 на 180°. Установите равенство освещённостей и опять измерьте расстояние r''_1 и r''_2. Из двух результатов найдите среднее $\overline{r_1}$ и $\overline{r_2}$.

Результаты измерения занесите в таблицу № 1.

Таблица 1

J_1 = 57 кд (*Ar* лампа 60 Вт)

№	r'_{1i}	r''_{1i}	$\overline{r_{1i}}$	$\overline{r_{1i}}^2$	r'_{2i}	r''_{2i}	$\overline{r_{2i}}$	$\overline{r_{2i}}^2$	J_{2i}	ΔJ_{2i}	$(\Delta J_{2i})^2$
1											
2											
и т.д.									—		
									J_2		$\sum_{i=1}^{n} (\Delta J_{2i})^2$

Измерения проведите не менее, чем троекратно, не изменяя расстояние между источниками света.

Задание 3. Определение коэффициента проницаемости нейтрального светофильтра.

Если на пути света, идущего от источников, будет находиться поглощающая среда, ослабляющая силу света J_1 в n_1 раз, а J_2 в n_2 раз, то равенство освещённостей запишется так:

$$\frac{J_1}{n_1 r_1^2} = \frac{J_2}{n_2 r_2^2}.$$

Если n — коэффициент ослабления, то $\frac{1}{n}$ называют **коэффици-**

ентом проницаемости.

В данной работе свет от эталонной лампы не поглощается ($n_1 = 1$), тогда проницаемость среды определяется из равенства:

$$\frac{1}{n_2} = \frac{J_1 r_2^2}{J_1}. \qquad (4.2)$$

В эксперименте в качестве поглощающей среды используется стек- лянный нейтральный светофильтр.

Вставьте светофильтр в правую обойму фотометра. Перемещая фотометр, добейтесь одинаковой освещённости обеих частей фото- метрического поля и отсчитайте расстояние до источников света. По- верните фотометр на 180° и повторите измерения. Зная силу света исследуемого источника (из задания № 2), определите по формуле

(4.2) коэффициент проницаемости $\frac{1}{n_2}$ нейтрального светофильтра.

Результаты измерений занесите в таблицу № 2.

Таблица 2

$J_1 = 57$ кд $\qquad\qquad$ $J_2 = \ldots$.

№	r'_{1i}	r''_{1i}	$\overline{r_{1i}}$	$\overline{r_{1i}}^2$	r'_{2i}	r''_{2i}	$\overline{r_{2i}}$	$\overline{r_{2i}}^2$	$\frac{1}{n_{2i}}$	$\Delta \frac{1}{n_{2i}}$	$\Delta \frac{1}{n_{2i}}$
1											
2											
и т.д.											
									$\frac{1}{n_{2ср}}$		

Измерения проводят не менее, чем троекратно, не изменяя расстояние между источниками света.

По результатам измерений рассчитайте среднюю квадратичнуюошибку (так же, как в задании 2).

Результаты запишите в виде

$$\frac{1}{n_2} = \frac{1}{n_2}_{ср} \quad \Delta \frac{1}{n_2} \qquad \text{при } \alpha = \ldots .$$

Задание 4. Изучение распределения света вокруг лампы накаливания.

Замените неподвижную исследуемую лампу лампой на вращающемся штативе. Поверните лампу так, чтобы указатель лимба совпал с "0". Определите силу света лампы в этом положении как в задании № 2. При расчёте силу света эталонной лампы примете за единицу. Затем поверните лампу вокруг оси на 15° и определите силу света в новом положении. Так, поворачивая лампу, определите силу света через каждые 15° вплоть до поворота на 180°.

Результаты измерений занесите в таблицу 3.

Таблица 3

№	ϕ_i	r'_{1i}	r''_{1i}	$\overline{r_{1i}}$	r_{1i}^2	r'_{2i}	r''_{2i}	$\overline{r_{2i}}$	r_{2i}^2	J_i
1	0°									
2	15°									
3	30°									
и	т.д.									

По данным таблицы 3 вычертите кривую распределения силы света лампы накаливания в зависимости от угла поворота, в полярных координатах, откладывая по радиусам соответствующую этим углам силу света.

Расчёт ошибок в этом задании произведите только по указанию преподавателя. Таблица 3 при этом сильно усложняется.

5. Контрольные вопросы

1. Фотометрические характеристики протяженных источников света: светимость, яркость (определение, единицы измерения).
2. Закон Ламберта. Зависимость между светимостью и яркостью косинусных излучателей (вывод формулы $R = \pi B$). Является ли лампа накаливания ламбертовским излучателем?
3. Почему сравниваемые освещенные поля в фотометре Луммера-Бродхуна имеют, как правило, различную окраску? Влияет ли это на точность измерений? Если влияет, то как повысить точность намерений?
4. Почему сила света лампы различна в различных направлениях? Есть ли источники, у которых сила света одинакова во всех направлениях? Приведите примеры.
5. Какие ещё методы фотометрирования вам известны?
6. Дайте описание известных вам фотометров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Том 1. Механика. Молекулярная физика : учебник для вузов / И. В. Савельев. — 18-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 436 с. — ISBN 978-5-8114-9890-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/221120

2. Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика : учебное пособие для вузов / И. В. Савельев. — 16-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 500 с. — ISBN 978-5-8114-8926-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/185339

3. Савельев, И. В. Курс общей физики : учебное пособие : в 3 томах / И. В. Савельев. — 13-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022 — Том 3 : Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц — 2022. — 320 с. — ISBN 978-5-8114-4598-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/206909

4. Избранные главы курса физики : учебное пособие для самостоятельной работы и лабораторных занятий / Н. С. Бухман [и др.] ; ред.: Н. С. Бухман, А. В. Пашин; Самар.гос.техн.ун-т.- Самара, 2019.- 507 с..- Режим доступа: https://elib.samgtu.ru/getinfo?uid=els_samgtu||elib||3796

5. Волощенко В.Ю., Сапогин В.Г. Оценка погрешностей при физических измерениях. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 31 с.