

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

А. В. Чжан, Т. О. Чичикова, Н. Н. Гурова

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Лабораторный практикум

Электронное издание

Красноярск 2021

ББК 22.3

Ч 57

Рецензент:

В.И. Иванов, канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой высшей математики и компьютерного моделирования

Ч 57 **Чжан, А. В.**
Общая физика: лабораторный практикум [Электронный ресурс] / А. В. Чжан, Т. О. Чичикова, Н. Н. Гурова; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2021. – 74 с.

Представлено описание лабораторных работ по темам: «Механика», «Молекулярная физика», «Электричество», «Оптика» и «Атомная физика». Приведенная нумерация лабораторных работ выбрана в соответствии с уже имеющейся нумерацией работ в аудитории.

Предназначено для студентов 1-го и 2-го курсов инженерных специальностей, изучающих односеместровый курс общей физики.

ББК 22.3

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Красноярского государственного аграрного университета

© Чжан А.В., Чичикова Т.О., Гурова Н.Н., 2021
© ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 6.1. Определение ускорения силы тяжести с помощью математического маятника	4
Лабораторная работа № 7. Определение приведенной длины физического маятника	7
Лабораторная работа № 1. Определение момента инерции твердого тела	10
Лабораторная работа № 18. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.....	14
Лабораторная работа № 4. Исследование влияния ферромагнитной среды на реактивное индуктивное сопротивление и индуктивность соленоида	18
Лабораторная работа № 2. Изучение вязкости жидкостей и газов.....	22
Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом течения через трубку	26
Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента поверхностного натяжения воды методом отрыва капель	30
Лабораторная работа № 1.1. Определение и исследование активного сопротивления проводников.....	34
Лабораторная работа № 16. Определение отношения молярных теплоемкостей воздуха методом Клеманса-Десорма.....	38
Лабораторная работа № 13. Определение длины монохроматической световой волны с помощью дифракционной решетки	43
Лабораторная работа № 20. Изучение альфа-излучения	47
Лабораторная работа № 26. Исследование зависимости энергетической светимости абсолютно черного тела от его температуры.....	52
Лабораторная работа № 14. Определение концентрации раствора глюкозы поляриметром	57
Лабораторная работа № 24. Изучение плоскополяризованного света.....	62
Лабораторная работа № 15. Изучение принципов защиты от ионизирующих излучений	66

Лабораторная работа № 6.1. Определение ускорения силы тяжести с помощью математического маятника

Цель работы: изучить законы кинематики и динамики вращательного движения твердых тел и методов определения ускорения

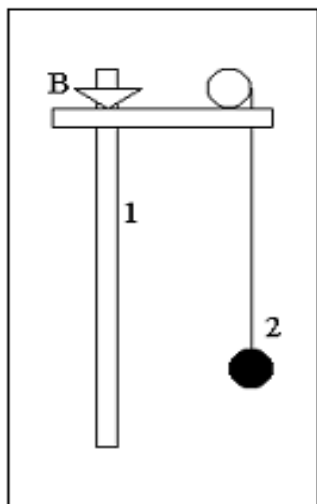


Рисунок 1 – Лабораторная установка:

1 – физический маятник;

2 – математический маятник

силы тяжести с помощью математического и физического маятников (рис. 1).

Приборы и материалы: модель математического маятника, секундомер, линейка.

Все тела в природе взаимно притягивают друг друга. Закон всемирного тяготения гласит, что между любыми двумя телами действуют силы взаимного притяжения, которые прямо пропорциональны массам этих тел и обратно пропорцио-

нальны квадрату расстояния между ними. Эти силы называются силами тяготения или гравитационными силами. Они всегда направлены вдоль прямой, проходящей через центры взаимодействующих тел.

Закон тяготения выражается формулой $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$, где m_1, m_2 – массы тел; r – расстояние между телами; γ – коэффициент пропорциональности – гравитационная постоянная. Силы тяготения не зависят от того, в какой среде находятся взаимодействующие тела.

Силой тяжести тела называется сила P , приложенная к телу и равная векторной сумме силы тяготения $F_{тяг}$ тела к Земле и центробежной силы инерции $F_{цб}$, обусловленной суточным вращением Земли: $P = F_{тяг} + F_{цб}$, причем модуль силы $F_{цб}$ равен: $F_{цб} = m\omega^2 R_3 \cos \varphi$, где m – масса тела; ω – угловая скорость суточного вращения Земли; R_3 – радиус Земли; φ – географическая широта места наблюдения.

Свободным падением тела называется движение, происходящее под действием только силы тяжести. Сила тяжести тела не зависит от скорости его относительного движения и может быть представлена в виде: $P = mg$, где g – ускорение силы тяжести или ускорение свобод-

ного падения (напомним, что согласно второму закону Ньютона сила $F = ma$, где a – ускорение тела).

Весом тела называют силу G , с которой это тело действует вследствие тяготения к Земле на опору или подвес, удерживающие тело от свободного падения. Если тело и опора (или подвес) неподвижны относительно Земли, то вес тела равен его силе тяжести

$$G = P = mg .$$

В случае движения тела и опоры (или подвеса) с некоторым ускорением a вес тела G не будет равен mg : $\vec{G} = m(\vec{g} - \vec{a})$.

Математический маятник – это идеализированная система, состоящая из материальной точки массой m , подвешенной на нерастяжимой невесомой нити, и колеблющаяся под действием силы тяжести. Хорошим приближением математического маятника является небольшой тяжелый шарик, подвешенный на тонкой длинной нити.

Период колебаний математического маятника – это время, за которое совершается одно полное колебание маятника. Формула периода колебаний математического маятника для случая малых амплитуд имеет вид:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}, \quad (1)$$

где ℓ – длина математического маятника, т. е. расстояние от точки подвеса до центра масс; g – ускорение силы тяжести.

Чтобы определить ускорение силы тяжести, нужно знать период колебания маятника T и его длину ℓ

$$g = \frac{4\pi^2 \ell}{T^2} . \quad (2)$$

Порядок выполнения работы

Приготовьте таблицу для записи результатов измерений.

1. Установите длину маятника ℓ (ее значение указывает преподаватель).

2. Раскачайте маятник с амплитудой не более 10 см. Измерьте время, за которое происходят 20 полных колебаний. Опыт повторите 5 раз.

№	ℓ	t	N	T	g_i	g_{cp}	Δg_i	Δg_i^2	Δg_{cp}	ε
Ед. изм.	м	с		с	м/с ²	м/с ²	м/с ²		м/с ²	%
1										
2										
3										
4										
5										

3. Вычислите период колебаний $T \left(T = \frac{t}{N} \right)$.

4. По формуле $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ вычислите g для всех пяти опытов.

5. Рассчитайте среднее значение ускорения силы тяжести g_{cp} , абсолютные Δg_i , Δg и относительную $\left(\varepsilon = \frac{\Delta g_{cp}}{g_{cp}} 100 \% \right)$ погрешности полученного результата по формулам:

$$g_{cp} = \frac{g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5}{5}, \quad \Delta g_i = |g_{cp} - g_i|,$$

$$\Delta g_{\text{нб}} = 2,8 \cdot \sqrt{\frac{\Delta g_1^2 + \Delta g_2^2 + \Delta g_3^2 + \Delta g_4^2 + \Delta g_5^2}{5 \cdot (5-1)}}.$$

Контрольные вопросы

1. Дайте определение траектории движения и перечислите простейшие ее виды.
2. Дайте определение понятий пути, скорости и ускорения.
3. Дайте определение силы.
4. Сформулируйте три закона Ньютона в механике.
5. Сформулируйте и запишите закон всемирного тяготения.
6. Дайте определение силы тяжести и веса тела. В чем отличие этих сил?
7. Что называется ускорением свободного падения и от чего зависит его величина?
8. Какое движение называется колебательным? Запишите уравнение смещения при гармоническом колебании.
9. Что называется амплитудой, фазой, начальной фазой, периодом, частотой, круговой частотой колебания?
10. Что называется математическим маятником? Запишите формулу периода колебаний математического маятника.

Лабораторная работа № 7. Определение приведенной длины физического маятника

Цель работы:

- 1) определить приведенную длину физического маятника теоретическим и опытным путем;
- 2) сравнить период колебаний математического маятника с длиной, равной приведенной длине физического маятника L , с периодом колебаний физического маятника.

Приборы и материалы: физический маятник, модель математического маятника, секундомер, масштабная линейка.

Физический маятник – любое твердое тело, закрепленное на оси, не проходящей через центр масс тела, например, металлический стержень.

Физический маятник может совершать свободные колебания относительно оси вращения. Характеристикой физического маятника является его приведенная длина. Она равна длине такого математического маятника, период колебаний которого совпадает с периодом колебаний данного физического маятника.

Физический маятник, используемый в данной работе, представляет собой однородный металлический стержень длиной l_0 и массой m , как показано на рисунке 1. Расстояние от центра масс стержня до оси вращения равно a .

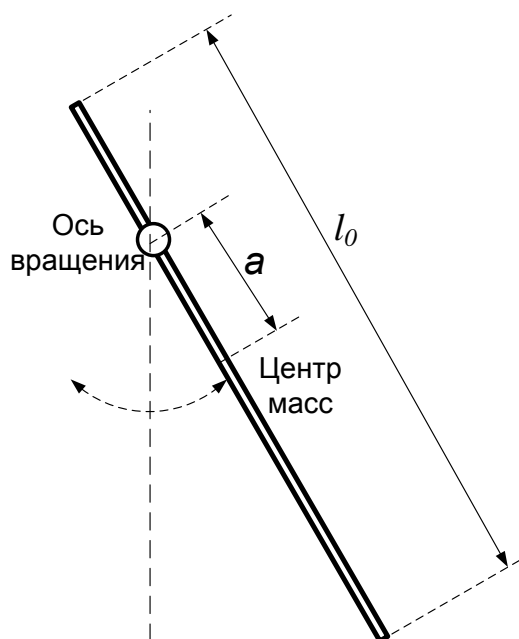


Рисунок 1 – Физический маятник

Порядок выполнения работы

Задание № 1. Определение приведенной длины физического маятника

Результаты измерений и расчетов представьте в таблице 1.

Таблица 1

$L_{теор}$ – теоретическая						$L_{эксп}$ – опытная				
№	m	l_0	a	J	$L_{теор}$	N	t	T	T_{cp}	$L_{эксп}$
Ед. изм.										
1										
2										
3										
4										
5										

1. Закрепите стержень так, чтобы ось вращения была на расстоянии a от центра массы. Центр массы стержня находится на половине его длины. Измерьте это расстояние, запишите в таблицу, а также длину l_0 и массу стержня m .

2. По формуле Штайнера $J = \frac{1}{12}m\ell_0^2 + ma^2$ рассчитайте момент инерции маятника.

3. По формуле $L = \frac{J}{ma}$ найдите теоретическое значение приведенной длины физического маятника $L_{теор}$.

4. Приведите в колебательное движение маятник. Амплитуда колебаний должна быть не более 5-10 см. Определите время t , за которое совершается N полных колебаний маятника (количество колебаний указывает преподаватель). Опыт повторите 5 раз.

5. Рассчитайте период колебаний маятника: $T = \frac{t}{N}$ и среднее значение T_{cp} .

6. Приняв ускорение свободного падения $g = 9,81 \frac{M}{c^2}$, из формулы $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ выведите выражение для расчета L – это будет опытное значение приведенной длины физического маятника, которое можно обозначить $L_{эксп}$. Сделайте расчет.

Задание № 2. Сравнение значений приведенной длины физического маятника, найденных теоретическим и опытным путем.

Результаты измерений и расчетов представьте в таблице 2.

1. Установите длину математического маятника ℓ , равную приведенной длине физического маятника, причем возьмите:

$$\ell = \frac{L_{теор} + L_{эксп}}{2}.$$

2. Раскачайте математический маятник, измерьте время, за которое совершается N колебаний (амплитуда колебаний – не более 10 см). Опыт повторите 5 раз.

3. Рассчитайте период колебаний и среднее значение $T_{ср}$.

4. Сравните периоды колебаний математического и физического маятника (см. табл. 1).

Таблица 2

№	N	t	T	$T_{ср. мат.}$	$T_{ср физ.}$	ℓ
Ед. изм.						
1						
2						
3						
4						
5						

Контрольные вопросы

1. Дайте определение момента силы, момента инерции.
2. Сформулируйте теорему Штайнера для момента инерции.
3. Какое движение называется колебательным?
4. Запишите уравнение смещения при гармоническом колебании.
5. Амплитуда, фаза, начальная фаза, период, частота, круговая частота колебания. Формулы, связывающие между собой период колебаний с частотой и с круговой частотой.
6. Что называется физическим маятником? Запишите формулу периода колебаний физического маятника.
7. Что называется приведенной длиной физического маятника?
8. Зависит ли период колебания физического маятника от его массы?
9. Как влияют на точность эксперимента колебания температуры, сила трения, амплитуда колебания маятника?

Лабораторная работа № 1. Определение момента инерции твердого тела

Цель работы: определить момент инерции твердого тела на основе второго закона Ньютона динамики вращательного движения.

Приборы и материалы: маятник Обербека, набор грузов, секундомер, штангенциркуль, масштабная линейка.

При поступательном движении инерционные свойства тела зависят от массы. Инерционные свойства вращающегося тела определяются моментом инерции I . Но если масса определяется только внутренними свойствами тела, то момент инерции зависит от расположения оси вращения, относительно которого происходит вращение.

Для определения момента инерции используют маятник Обербека, который состоит из четырех стержней, укрепленных на втулке под прямым углом друг к другу (рис. 1). Вся система может свободно вращаться вокруг горизонтальной оси. По стержням могут перемещаться и закрепляться четыре одинаковых груза массой m_0 , находящихся на расстояниях L от оси вращения.

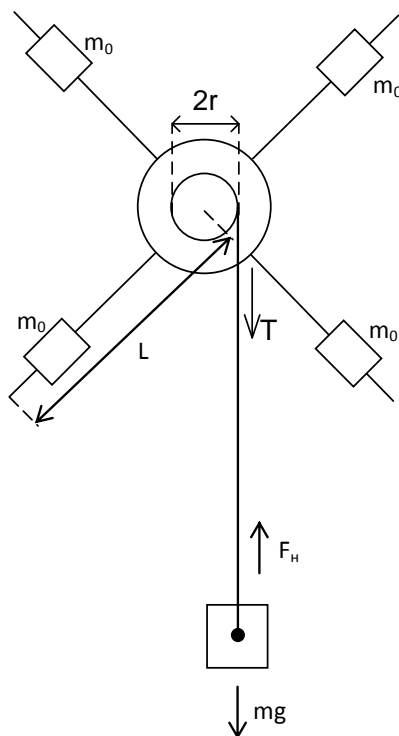


Рисунок 1 – Схема маятника Обербека

Момент инерции системы можно определить в виде:

$$I_2 = I_0 + 4I_1,$$

где через I_0 обозначена сумма моментов инерции шкивов, подшипника и четырех стержней, а через I_1 – момент инерции груза.

Тогда

$$4I_1 = I_2 - I_0. \quad (1)$$

Если рассматривать грузы в виде материальных точек, то значение I_1 можно определить по формуле

$$I_1 = m_0L_1^2 + m_0L_2^2 + m_0L_3^2 + m_0L_4^2,$$

где L_1, L_2, L_3, L_4 – расстояния от оси вращения до центра грузов.

Если $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L$, то:

$$I_1 = m_0L^2. \quad (2)$$

В данной работе последовательно определяются:

- момент инерции системы с грузами I_2 ;
- момент инерции системы без грузов I_0 ;
- из формулы (1) находится экспериментальное значение момента инерции груза I_1 ;
- из формулы (2) определяется теоретическое значение I_1 и производится сравнение с его экспериментальным значением.

Вращательное движение всей системы совершается под действием вращательного момента M :

$$M = r \cdot T, \quad (3)$$

где T – сила натяжения нити (см. рис. 1); r – радиус шкива, на который намотана нить.

Из основного закона вращательного движения:

$$\varepsilon = \frac{M}{I} \quad (4)$$

следует, что угловое ускорение ε этой системы зависит от момента инерции тела I .

Выразим угловое ускорение ε через тангенциальное ускорение a .

Так как

$$a = \varepsilon \cdot r,$$

то, с учетом (3) и (4), находим:

$$a = \frac{T \cdot r^2}{I}. \quad (5)$$

Так как из третьего закона Ньютона следует, что $F_H = T$, то запишем второй закон Ньютона для перегруза массой m :

$$ma = mg - T, \quad (6)$$

отсюда

$$T = m(g - a). \quad (7)$$

Подставляем в (5) и найдем:

$$a = \frac{m \cdot (g - a) \cdot r^2}{I}. \quad (8)$$

Тогда

$$I = mr^2 \left(\frac{g}{a} - 1 \right). \quad (9)$$

Порядок выполнения работы

Задание № 1. Определение I_0 .

Получите у преподавателя принадлежности для выполнения работы (штангенциркуль, перегруз).

1. Снимите грузы со стержней. С помощью штангенциркуля измерьте r – радиус шкива, на который намотана нить.

2. Подвесьте к нити перегруз массой $m = 0,3$ кг и отпустите его, включите секундомер и измерьте время t , в течение которого груз из состояния покоя опустится на расстояние h (брать до конца опускания перегруза). Опыт повторите 5 раз. Результаты измерений запишите в таблицу 1.

Таблица 1

№	m	$h =$			$r =$			
		t_i	a_i	I_{0i}	I_{0cp}	ΔI_{0i}	ΔI_{0icp}	$\Delta I_{0icp} / I_{0cp}$
Ед. изм.	кг							
1	0,3							
2								
3								
4								
5								

3. По формуле (движение перегруза равноускоренное) найдите:

$$a = \frac{2h}{t^2}. \quad (10)$$

4. По формуле (8) рассчитайте моменты инерции I_0 и занесите их в таблицу.

5. Найдите среднее значение I_{0cp} , а также среднеквадратическую и относительную погрешности.

Задание № 2. Определение I_2 .

1. Установите грузы на центр стержней.

2. Подвесьте к нити перегруз $m = 0,3$ кг и отпустите его, включите секундомер и измерьте время t , в течение которого груз из состояния покоя опустится на расстояние h (брать до конца опускания перегруза). Опыт повторите 5 раз. Результаты измерений записывайте в таблицу 2.

Таблица 2

№	m	$h=$			$r=$			
		t_i	a_i	I_{2i}	I_{2cp}	ΔI_{2i}	ΔI_{2icp}	$\Delta I_{2icp} / I_{2cp}$
Ед. изм.	кг							
1	0,3							
2								
3								
4								
5								

3. По формуле равноускоренного движения (10) рассчитайте ускорения движения перегруза при этих условиях.

4. По формуле (9) рассчитайте момент инерции грузов I_2 и занесите в таблицу.

5. Найдите среднее значение I_{2cp} , а также среднеквадратическую и относительную погрешности.

6. По формуле (1) найдите момент инерции груза (для средних значений I_0 и I_2).

7. По формуле (2) найдите теоретическое значение момента инерции грузов. Массу одного груза принять равной 0,085 кг. Расстояние от оси вращения до центра грузов измерьте линейкой.

8. Найдите разницу между теоретическим и экспериментальным значениями I_1 и проанализируйте причины наблюдаемого отличия.

Контрольные вопросы

1. Какое движение называется поступательным? Какое – вращательным?

2. Дайте определение углового пути, угловой скорости, углового ускорения. Напишите их связь с линейными величинами.

3. Что называется моментом силы? Какими единицами измеряется момент силы?

4. Дайте определение момента инерции материальной точки и твердого тела. Какими единицами измеряется момент инерции? Запишите выражения момента инерции для тел различной формы.

5. Сформулируйте и запишите основной закон динамики вращательного движения.

6. Запишите полную кинетическую энергию тела, участвующего в поступательном и вращательном движениях.

7. Почему в том случае, когда грузы на стержнях ближе к оси вращения, время движения меньше?

Лабораторная работа № 18. Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

Цель работы: ознакомиться с основными характеристиками магнитного поля, определить горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли.

Приборы и материалы: источник постоянного напряжения, катушки Гельмгольца, компас.

Подобно тому, как в пространстве, окружающем электрические заряды, возникает электростатическое поле, в пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникает поле, называемое магнитным. Особенностью магнитного поля является то, что оно действует только на движущиеся электрические заряды. Силовыми характеристиками магнитного поля являются две величины: напряженность \vec{H} (вектор напряженности магнитного поля) и индукция (вектор магнитной индукции) \vec{B} . Напряженность магнитного поля измеряется в А/м, индукция – в Теслах (Тл).

Земля представляет собой огромный шарообразный магнит. Схема силовых линий магнитного поля Земли показана на рисунке 1. Земля имеет магнитные полюса, как и у обычного магнита: северный N и южный S. Магнитные полюса не совпадают с геомагнитными: рядом с магнитным северным полюсом расположен южный геомагнитный полюс. Вертикальная плоскость, в которой расположена стрелка, называется плоскостью магнитного меридиана, а угол между магнитным и географическим меридианами – магнитным склонением. Он постоянно меняется, что обусловлено внутренними процессами, которые происходят внутри Земли.

Если свободно установить магнитную стрелку, то она будет направлена по направлению касательной к силовой линии. Так как компас устанавливается горизонтально, то магнитная стрелка устанавливается не по направлению силовых линий магнитного поля, а под некоторым углом φ к нему. Этот угол называют магнитным наклоном. С приближением к магнитному полюсу угол увеличивается и на магнитном полюсе $\varphi = 90^\circ$.

В любой точке земной поверхности вектор индукции магнитного поля Земли B можно разложить на две составляющие в плоскости магнитного меридиана: вертикальную $B_{вер}$ и горизонтальную $B_{гор}$ (см. рис. 1).

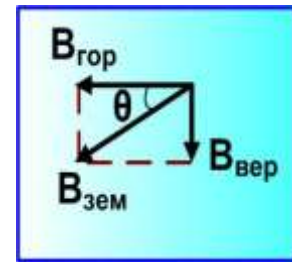


Рисунок 1 – Магнитное поле Земли

Данная работа выполняется с использованием компаса, который помещается внутрь катушек Гельмгольца (рис. 2). Катушки Гельмгольца представляют собой два коротких соленоида радиуса R , по которым ток течет в одном направлении. Соленоиды расположены на расстоянии R друг относительно друга. При включении обеих катушек в воздушном пространстве между ними образуется почти однородное магнитное поле.

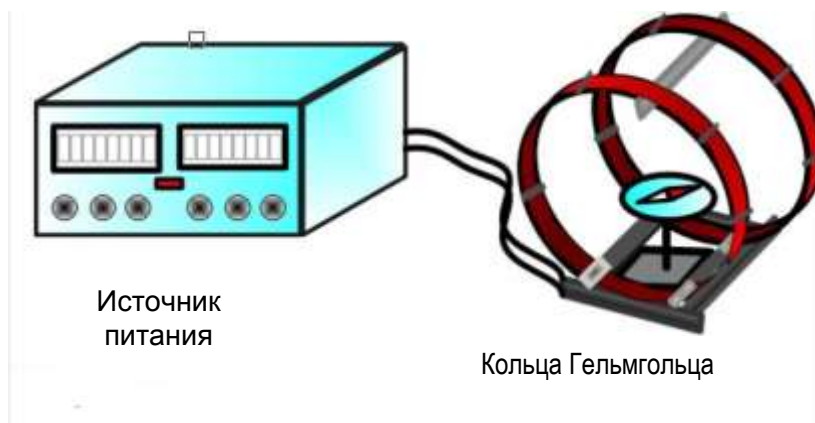


Рисунок 2 – Катушки Гельмгольца

Обозначим индукцию магнитного поля в центре между катушками Гельмгольца B_K , оно направлено по оси и равно:

$$\vec{B}_K = \mu\mu_0 \cdot \frac{0,72 \cdot I \cdot n}{R},$$

где μ – магнитная проницаемость среды между катушками, здесь среда воздух $\mu = 1$; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная; n – количество витков в одном соленоиде; I – величина тока; R – радиус витка.

Определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли с помощью колец Гельмгольца состоит в следующем. Если установить на площадку в центре катушек магнитный компас и развернуть плоскости катушек параллельно магнитной стрелке, горизонтальная составляющая индукции магнитного поля Земли $B_{гор}$ будет направлена вдоль плоскости катушек. При включении тока магнитное поле в катушках B_K окажется направленным перпендикулярно $B_{гор}$, стрелка компаса повернется на угол φ по направлению суммарного поля. Величина угла поворота определяется соотношением:

$$tg\varphi = \frac{B_m}{B_{гор}}$$

Тогда

$$B_{гор} = \frac{B_K}{tg\varphi}$$

Следовательно,

$$B_{гор} = \mu\mu_0 \cdot \frac{0,72 \cdot I \cdot n}{tg\varphi \cdot R} \quad (1)$$

Порядок выполнения работы

1. Установите катушки так, чтобы стрелка компаса была направлена на НУЛЬ шкалы компаса.
2. Включите ток и измерьте угол отклонения концов стрелки φ_1 .
3. С помощью переключателя измените направление тока на противоположное и снова измерьте угол отклонения стрелки φ_2 .
4. Найдите

$$\varphi_{ср.} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$$

Результаты измерений I и φ занесите в таблицу.

№	I, A	φ_1	φ_2	$\varphi_{ср.}$	$tg\varphi_{ср.}$	$B_{гор}, Tл$	$B_{гор\ ср.}, Tл$	$\Delta B_i, Tл$	$(\Delta B_i)^2$	$\Delta B_{ср}$
1										
2										
3										
4										
5										

5. Опыт повторите для 5 различных значений тока : 10, 20, 30, 40, 50 мА.

6. По формуле (1) вычислите $B_{\text{гор}}$ – значение горизонтальной составляющей земного поля в системе СИ для каждого значения силы тока (радиус и число витков катушки указаны на установке).

7. Вычислите $B_{\text{ср}}$ по формуле

$$B_{\text{ср}} = \frac{\sum B_{\text{изм } i}}{n},$$

где n – число измерений.

8. Найдите доверительную границу общей погрешности по формуле

$$\Delta B_{\text{гор}} = t_{\alpha}(n) \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum (\Delta B_i)^2},$$

где $t_{\alpha}(n)$ – коэффициент Стьюдента (при $\alpha = 0,95$ и $n = 5$ $t_{\alpha}(n) = 2,8$).

9. Результаты запишите в виде выражения

$$B_{\text{гор}} = B_{\text{ср}} \pm \Delta B_{\text{ср}}.$$

Контрольные вопросы

1. Что вызывает появление магнитного поля?
2. Что называется напряженностью магнитного поля и ее физический смысл? Какова единица ее измерения?
3. Что называется индукцией магнитного поля и ее физический смысл? Какова единица ее измерения?
4. Что называется магнитным потоком?
5. Как определяется направление индукции магнитного поля прямого и кругового проводников с токами?
6. Дайте определение силы Ампера и определите направление силы Ампера для проводника с током в магнитном поле.
7. Дайте определение силы Лоренца.
8. Расскажите об основных параметрах магнитного поля Земли.
9. Как направлено магнитное поле Земли относительно географических меридианов и полюсов?

Лабораторная работа № 4. Исследование влияния ферромагнитной среды на реактивное индуктивное сопротивление и индуктивность соленоида

Цель работы: определить реактивное индуктивное сопротивление и индуктивность соленоида; исследовать влияние ферромагнитной среды на индуктивность соленоида.

Приборы и материалы: источник переменного тока, реостат, исследуемый проводник, амперметр, вольтметр, ключ.

В пространстве, окружающем проводник с током силой I (А), возникает *магнитное поле*, которое в каждой своей точке характеризуется вектором напряженности \vec{H} (А/м) или вектором магнитной индукции \vec{B} (Тл). Причем в вакууме

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H},$$

а в магнитной среде

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость среды (характеристика ее магнитных свойств). В ферромагнетиках μ может достигать значений $\sim 10^5$.

При изменении силы тока в проводнике со скоростью dI/dt магнитная индукция окружающего ток поля будет изменяться со скоростью dB/dt . Если при этом вектор магнитной индукции пересекает плоскость, ограниченную площадью S , под углом α к нормали плоскости, то вводят величину:

$$\Phi = BS \cos \alpha \text{ (Вб)},$$

называемую *магнитным потоком*. Переменное магнитное поле создает переменный магнитный поток $d\Phi/dt$.

Если площадь S охватывает замкнутый проводник (контур), то пересекающий его переменный магнитный поток создаст в проводнике электродвижущую силу (ЭДС) $\varepsilon_{\text{инд}}$, которая вызовет в контуре ток индукции $I_{\text{инд}}$. Закон электромагнитной индукции сформулировал М. Фарадей в виде

$$\varepsilon_{\text{инд}} = - \frac{d\Phi}{dt} \text{ (В)}.$$

Знак «минус» в этом законе обусловлен *правилом Ленца*:

индукционный ток $I_{\text{инд}}$ в контуре всегда имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызвавшему этот ток.

Созданный в проводящем контуре переменный ток dI/dt образует собственный переменный поток $d\Phi/dt$, который по закону Фарадея создаст ЭДС самоиндукции ε_c и соответствующий ей ток самоиндукции силой I_c . При этом будет соблюдаться пропорциональность между магнитным потоком и током

$$\Phi = LI_c,$$

где L – индуктивность (Гн) контура.

Соленоид (от греч. *solen* – трубка и *eidos* – вид) – это цилиндрическая катушка, состоящая из большого числа намотанных вплотную друг к другу витков проводника. Каждый виток соленоида можно рассматривать как отдельный контур. Поэтому соленоид обладает индуктивностью

$$L = \mu_0 \mu n^2 V = \frac{\mu_0 \mu N^2 S}{\ell}, \quad (1)$$

где N – полное число витков; $n = \frac{N}{\ell}$ – число витков, приходящихся на единицу длины ℓ соленоида; $V = S\ell$ – объем соленоида. При протекании по соленоиду переменного тока с циклической частотой ω соленоид будет оказывать току *реактивное индуктивное сопротивление*: $X_L = \omega L$, обусловленное явлением электромагнитной индукции.

В общем случае цепь переменного тока содержит последовательно включенные резистор с сопротивлением R , соленоид с индуктивностью L , конденсатор с емкостью C и источник с ЭДС, который изменяется во времени по закону:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cos \omega t.$$

Полное сопротивление такой цепи равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2},$$

здесь R – активное сопротивление,

$$X = X_L - X_C = \omega L - 1/\omega C,$$

где X – реактивное сопротивление. Закон Ома для такой цепи будет иметь вид:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{Z},$$

где I_m – амплитуда силы тока; ε_m – амплитудное значение ЭДС источника).

В этой лабораторной работе электрическая цепь содержит соленоид и источник тока, ЭДС которого изменяется по закону $\varepsilon = \varepsilon_m \cos \omega t$ с циклической частотой ω (см. рис. 1). При включенном токе падение напряжения на концах соленоида равно:

$$U_L = U_m \cos \omega t, \quad U_m = I_m \omega L.$$

Реактивное индуктивное сопротивление

$$X_L = \omega L$$

будет определяться соотношением:

$$X_L = U_m / I_m \quad \text{или} \quad X_L = U_L / I_m \quad (2)$$

В том случае, если в электрической цепи отсутствует емкость, из двух последних формул следует, что индуктивность соленоида можно определить по формуле

$$L = U_L / \omega I_m,$$

где $\omega = 2\pi\nu$; частота $\nu = 50$ Гц.

Порядок выполнения работы

1. Проверьте соответствие собранной электрической цепи схеме (рис. 1). Включив установку, зафиксируйте определенную силу тока в цепи и соответствующее ей напряжение на концах соленоида.

2. Рассчитайте реактивное индуктивное сопротивление X_L по формуле (2) и индуктивность L соленоида по формуле (1).

3. Измерения повторите не менее пяти раз при различных значениях силы тока сначала без ферромагнитного сердечника в соленоиде, а затем с сердечником.

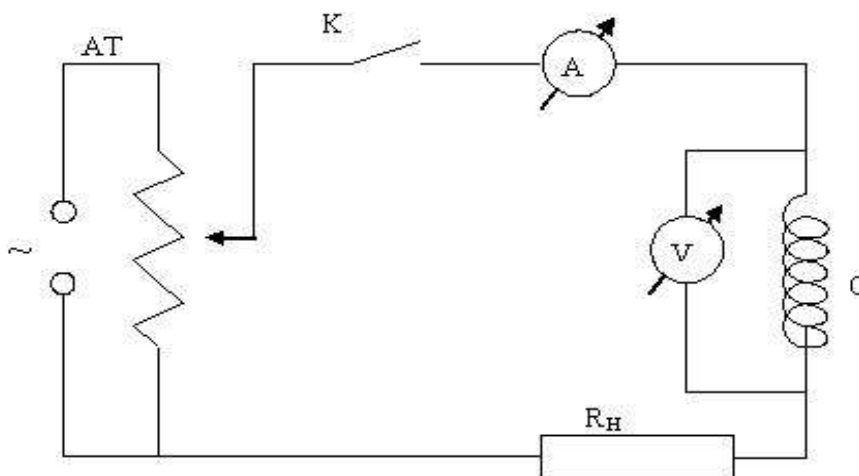


Рисунок 1 – Схема для исследования влияния ферромагнитной среды на индуктивное сопротивление и индуктивность соленоида:

AT – автотрансформатор; *C* – соленоид; *R_н* – нагрузочное сопротивление; *A* – амперметр; *V* – вольтметр

4. Ошибку измерений индуктивности определите по формуле

$$\Delta L_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta L_i^2}{n(n-1)}},$$

где n – число измерений; $\Delta L_i = |L_{\text{ср}} - L_i|$ – абсолютные ошибки каждого отдельного измерения.

5. Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу 1.

Без сердечника									
	I_m	U_L	X_L	L	L_{cp}	ΔL_i	$(\Delta L_i)^2$	ΔL_{cp}	ε
Ед. изм.	А	В	Ом	Гн	Гн	Гн		Гн	
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									
С сердечником									
	I_m	U_L	X_L	L	L_{cp}	ΔL_i	$(\Delta L_i)^2$	ΔL_{cp}	ε
Ед. изм.									
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									

Контрольные вопросы

1. Дайте определение магнитного поля и его характеристик: магнитной индукции, магнитного потока.
2. Что называется индуктивностью магнитного контура?
3. Сформулируйте явление электромагнитной индукции и запишите закон Фарадея для электромагнитной индукции.
4. Сформулируйте правило Ленца.
5. Дайте определение индуктивности и ее единицы измерения. От чего зависит индуктивность соленоида?
6. Сформулируйте определение явления самоиндукции. При каких условиях возникает ЭДС самоиндукции?
7. Каковы физические причины активного и реактивного сопротивлений?
8. Запишите закон Ома для цепи переменного тока с последовательно включенными в нее резистором, конденсатором и соленоидом.
9. Дайте определение ферромагнетикам, парамагнетикам и диамагнетикам.
10. Объясните рост индуктивности соленоида при помещении в него стального сердечника.

Лабораторная работа № 2. Изучение вязкости жидкостей и газов

Цель работы: определить коэффициент внутреннего трения жидкости методом Стокса.

Приборы и материалы: стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью, мелкие шарики, штангенциркуль, секундомер, масштабная линейка.

При течении реальной жидкости ее отдельные слои движутся с разными скоростями и воздействуют друг на друга с силой, касательной к поверхности слоев – это сила внутреннего трения или вязкость.

Коэффициент внутреннего трения (или *динамическая вязкость*) численно равен силе внутреннего трения, возникающей между слоями вещества площадью один метр при градиенте скорости движения слоев, равном единице $[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}$. Если же говорить, от чего он зависит, то нужно говорить о длине свободного пробега молекул, их скорости и плотности вещества.

Жидкости, коэффициент динамической вязкости которых не зависит от величины градиента скорости жидкости, называются *ньютоновскими*. *Неньютоновские* жидкости состоят из крупных сложных молекул, и их вязкость зависит от градиента скорости. Увеличение вязкости происходит потому, что при течении работа затрачивается на преодоление истинной ньютоновской вязкости и на разрушение динамической структуры жидкости. Например, кровь – неньютоновская жидкость.

Ламинарное течение жидкости или газа – это слоистое течение без перемешивания слоев. При увеличении скорости течения жидкости или газа вследствие неоднородности давления по поперечному сечению трубы создаются завихрения, и движение становится *вихревым*, или *турбулентным*. Характер течения определяется безразмерной величиной – *числом Рейнольдса*:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta}. \quad (1)$$

Если в данных условиях число Рейнольдса оказывается больше критического, например, для гладких труб это $\text{Re}_{\text{кр}} = 2300$, то течение будет турбулентным.

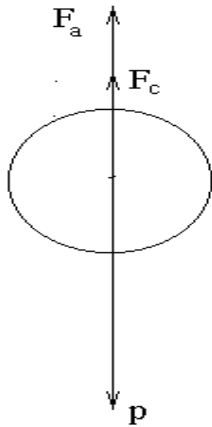


Рисунок 1 – Силы, действующие на шарик, падающий в жидкости или газе

На всякое тело, движущееся в вязкой жидкости, действует сила сопротивления. Стоксом было показано, что при ламинарном обтекании шарика безграничной жидкостью сила сопротивления определяется формулой $F_c = 6\pi\eta vr$, где η – коэффициент внутреннего трения жидкости; v – скорость шарика; r – радиус шарика. Характер обтекания определяется значением числа Рейнольдса.

Рассмотрим свободное падение шарика в вязкой жидкости. На шарик действуют три силы (см. рис. 1):

1. Сила тяжести: $P = m_1g = V_1\rho_1g = \frac{4}{3}\pi r^3\rho_1g$, где m_1 – масса шарика; ρ_1 – плотность вещества шарика; V_1 – объем шарика; g – ускорение силы тяжести.

2. Архимедова сила: $F_a = mg = V_1\rho g = \frac{4}{3}\pi r^3\rho g$, где m – масса вытесненной жидкости; ρ – плотность жидкости.

3. Сила сопротивления: $F_c = 6\pi\eta vr$, зависящая от скорости движения шарика.

Запишем уравнение движения шарика в жидкости в соответствии со вторым законом Ньютона:

$$\frac{4}{3}\pi r^3\rho_1g - \frac{4}{3}\pi r^3\rho g - 6\pi\eta vr = m \frac{dv}{dt}.$$

Сила сопротивления с увеличением скорости движения шарика возрастает, а ускорение уменьшается, и, наконец, шарик достигает такой скорости, при которой ускорение становится равным нулю.

Тогда уравнение принимает вид: $\frac{4}{3}\pi r^3g(\rho_1 - \rho) - 6\pi\eta vr = 0$.

В этом случае шарик движется с постоянной скоростью v_0 . Такое движение шарика называется установившимся. Решая уравнение относительно коэффициента внутреннего трения, получаем:

$$\eta = \frac{2}{9}gr^2 \frac{(\rho_1 - \rho)}{v_0}. \quad (2)$$

Выразим радиус шарика r через диаметр d : $r = \frac{d}{2}$, тогда уравнение (2) принимает вид:

$$\eta = \frac{gd^2(\rho_1 - \rho)}{18\nu_0}. \quad (3)$$

Порядок выполнения работы

Установка для измерения коэффициента внутреннего трения по методу Стокса представляет собой стеклянный цилиндр, наполненный глицерином. Цилиндр укреплен на подставке, которая устанавливается строго вертикально. Для измерения коэффициента внутреннего трения глицерина ($\rho = 1260 \text{ кг/м}^3$) используются мелкие железные шарики ($\rho_1 = 7800 \text{ кг/м}^3$).

Получите у преподавателя принадлежности для выполнения работы. Результаты всех измерений и расчетов записывайте в таблицу.

1. Предварительно с помощью ниток поставьте метки на цилиндре: первая – на расстоянии 5-10 см от поверхности жидкости; вторая – на расстоянии 10-15 см от первой. Измерьте расстояние ℓ между метками.

2. Измерьте диаметр первого шарика штангенциркулем, рассчитайте радиус шарика.

3. Опускайте шарик в цилиндр с жидкостью как можно ближе к оси цилиндра. В момент прохождения шарика через 1-ю метку включите секундомер, в момент прохождения шарика через 2-ю метку остановите секундомер, показания секундомера – время движения шарика между метками t .

4. Измерения по пунктам (2) и (3) повторите еще 4 раза с другими шариками.

5. Считая, что к моменту прохождения шариком метки 1 скорость его уже установилась, рассчитайте скорости падения шариков по формуле $\nu_0 = \frac{\ell}{t}$.

6. По формуле (2) рассчитайте коэффициенты внутреннего трения глицерина для всех пяти опытов.

7. Рассчитайте среднее значение коэффициента вязкости η_{cp} , $\Delta\eta$, $\Delta\eta_{cp}$ и относительную ошибку полученного результата:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\eta_{cp}}{\eta_{cp}} \cdot 100\%.$$

8. Рассчитайте число Рейнольдса один раз (для любого измерения) и сделайте вывод о характере обтекания шарика жидкостью.

$\rho = 1260 \text{ кг/м}^3$			$\rho_l = 7800 \text{ кг/м}^3$							
№	d	ℓ	t	v_0	η	η_{cp}	$\Delta\eta_i$	$\Delta\eta_{cp}$	ε	Re
Ед.изм.										
1										
2										
3										
4										
5										

$$\eta_{cp} = \frac{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5}{5}, \quad \Delta\eta_i = |\eta_{cp} - \eta_i|,$$

$$\Delta\eta_{cp} = 2,8 \cdot \sqrt{\frac{\Delta\eta_1^2 + \Delta\eta_2^2 + \Delta\eta_3^2 + \Delta\eta_4^2 + \Delta\eta_5^2}{5 \cdot (5-4)}}.$$

Контрольные вопросы

1. Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкости? Почему с некоторого момента времени шарик в жидкости движется равномерно?

2. Дайте определение силы вязкого трения, силы Стокса и Архимеда.

3. Объясните молекулярно-кинетический механизм вязкости. Что такое среднее число столкновения, средняя скорость движения, эффективный радиус молекул?

4. Запишите выражение закона Ньютона для внутреннего трения. От чего зависит сила внутреннего трения, куда она направлена?

5. Что называется коэффициентом динамической вязкости жидкости?

6. Дайте определение градиента скорости.

7. Определите ламинарное и турбулентное течение, число Рейнольдса.

Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента внутреннего трения жидкости методом течения через трубку

Цель работы: изучить течение вязкой жидкости и метода течения через трубку и определить коэффициент внутреннего трения жидкости.

Приборы и материалы: стеклянный сосуд с исследуемой жидкостью и прикрепленная к нему стеклянная трубка, линейка, секундомер, мерный стакан.

При течении реальной жидкости ее отдельные слои движутся с разными скоростями и воздействуют друг на друга с силой, касательной к поверхности слоев. Это взаимодействие слоев называется силой внутреннего трения, или вязкостью.

Коэффициент внутреннего трения (или *динамическая вязкость*) численно равен силе внутреннего трения, возникающей между слоями вещества площадью один метр при градиенте скорости движения слоев, равном единице $[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}$. Если же говорить, от чего он зависит, то нужно говорить о длине свободного пробега молекул, их скорости и плотности вещества.

Жидкости, коэффициент динамической вязкости которых не зависит от величины градиента скорости жидкости, называются *ньютоновскими*. *Неньютоновские* жидкости состоят из крупных сложных молекул, и их вязкость зависит от градиента скорости. Увеличение вязкости происходит потому, что при течении работа затрачивается на преодоление истинной ньютоновской вязкости и на разрушение динамической структуры жидкости. Например, кровь – неньютоновская жидкость.

Ламинарное течение жидкости или газа – это слоистое течение без перемешивания слоев. При увеличении скорости течения жидкости или газа вследствие неоднородности давления по поперечному сечению трубы создаются завихрения, и движение становится *вихревым*, или *турбулентным*. Характер течения определяется безразмерной величиной – *числом Рейнольдса*:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} . \quad (1)$$

Если в данных условиях число Рейнольдса оказывается больше критического, например, для гладких труб это $Re_{кр} = 2300$, то течение будет турбулентным.

В данной лабораторной работе коэффициент внутреннего трения воды определяется методом протекания через стеклянную трубку. Французский ученый Пуазейль показал, что объем жидкости V , протекающий за время t через трубку радиуса r и длиной ℓ под действием разности давлений ΔP на ее концах, может быть выражен

соотношением (закон Пуазейля): $V = \frac{\pi r^4 t \Delta P}{8 \eta \ell}$.

Из этой формулы можно получить выражение для расчета коэффициента внутреннего трения жидкости:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta P t}{8 V \ell}. \quad (2)$$

Установка для определения коэффициента внутреннего трения (рис. 1) состоит из стеклянного сосуда A , к которому при помощи резиновой трубки присоединена стеклянная трубка BC . Подставка D служит для подъема и опускания трубки BC . Исследуемая жидкость стекает в сосуд E .

Здесь h_1 – высота жидкости в сосуде до опыта; h_2 – высота жидкости в сосуде после опыта; h – высота конца капилляра.

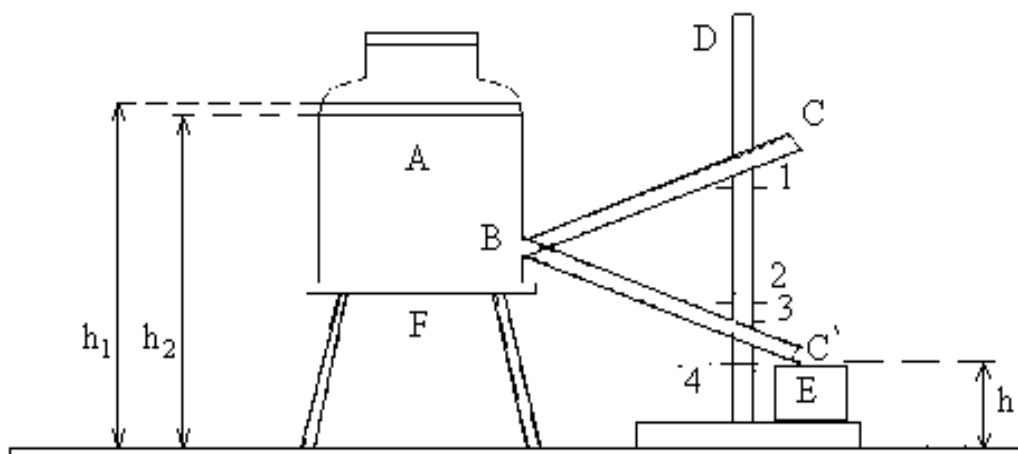


Рисунок 1 – Схема установки для определения коэффициента внутреннего трения

В начальный момент времени вытекание жидкости через трубку происходит под давлением столба жидкости, высота которого равняется разности высоты уровня жидкости в сосуде A и высоты конца

трубки ($h_1 - h$) (обе высоты измеряются от поверхности стола, которую считаем строго горизонтальной). В конце опыта, когда из сосуда уже вытек определенный объем жидкости, эта разность будет равна ($h_2 - h$). Средняя разность высот уровней жидкости за время опыта составляет: $\frac{(h_1 - h) + (h_2 - h)}{2} = \frac{(h_1 + h_2)}{2} - h$.

Отсюда разность давлений ΔP на концах трубки равна:

$$\Delta P = \left(\frac{h_1 + h_2}{2} - h \right) \rho g, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости; g – ускорение силы тяжести; ℓ – длина трубки (определяется масштабной линейкой); $r = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м – радиус капиллярной трубки; V – объем жидкости, вытекающий в течение времени t из трубки (измеряется мерным стаканом, 1 мл = 10^{-6} м³).

Порядок выполнения работы

Результаты измерений и расчетов представьте в таблице.

	$\ell =$			$r =$									
№	h_1	h_2	h	ΔP	V	t	η	η_{cp}	$\Delta \eta_i$	$(\Delta \eta_i)^2$	$\Delta \eta_{cp}$	ε	
Ед. изм	м	м	м	Па	м ³	с	Па·с	Па·с	Па·с	Па·с	Па·с	%	
1													
2													
3													
4													
5													

1. Измерьте высоту h_1 и объем мерного стакана, который будет наполняться водой V .

2. Трубку опустите из положения 1 в положение 2 и измерьте время наполнения мерного стакана на объем V . Когда стакан наполнится, трубку поднимите в положение 1, измерьте высоту h_2 (если каждый раз возвращать вылитую жидкость в сосуд, высоты h_1 и h_2 будут одинаковыми при повторении измерений). Высота h измеряется во время вытекания жидкости.

3. Опыт повторите еще 4 раза для разных высот h (см. рис. 1).

4. Измерьте и запишите в таблицу длину капиллярной трубки ℓ , радиус капилляра r . Рассчитайте ΔP по формуле (2), вычислите η по формуле (1). Рассчитайте средние значения, погрешности.

Контрольные вопросы

1. Объясните молекулярно-кинетический механизм вязкости. Что такое среднее число столкновений, средняя скорость движения, эффективный радиус молекул?
2. Запишите выражение закона Ньютона для внутреннего трения. От чего зависит сила внутреннего трения, куда она направлена?
3. Что называется коэффициентом динамической вязкости жидкости и газов?
4. Почему коэффициент внутреннего трения жидкостей убывает с температурой, а у газов – возрастает?
5. Что называется коэффициентом кинематической вязкости? Каковы единицы их измерения?
6. Какое движение жидкости называется ламинарным и какое турбулентным?
7. Что определяет число Рейнольдса?
8. Сформулируйте и запишите закон Пуазейля.

Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента поверхностного натяжения воды методом отрыва капель

Цель работы: изучить круг явлений, связанных с поверхностным натяжением; ознакомиться с методикой измерения поверхностного натяжения методом отрыва капли; определить коэффициент поверхностного натяжения воды при комнатной температуре.

Приборы и материалы: бутылка с водой, мерный стакан.

Сила поверхностного натяжения равна сумме сил, действующих на контур, ограничивающий поверхность жидкости, и равна произведению коэффициента поверхностного натяжения жидкости σ на длину контура l :

$$F_{\sigma} = \sigma \cdot l.$$

Коэффициент поверхностного натяжения можно рассматривать как силу F , приходящуюся на единицу длины контура l свободной поверхности жидкости S , действующую перпендикулярно к линии контура в плоскости, касательной к поверхности.

Для определения коэффициента поверхностного натяжения используется метод отрыва капли. Лабораторная установка состоит из бюретки, на конце которой укреплен капилляр в виде иглы.

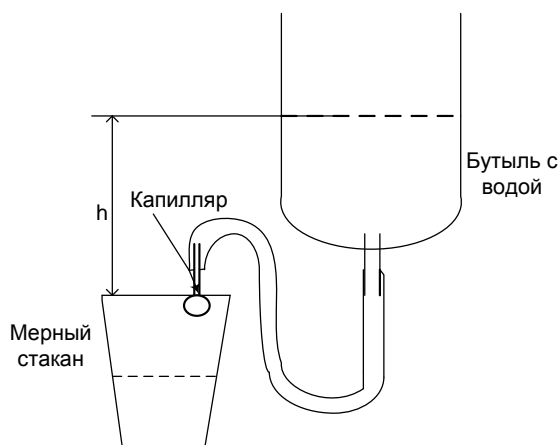


Рисунок 1 – Схема установки для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва капли при ее протекании через капилляр

Если наполнить жидкостью бутылку (см. рис. 1), то на конце капилляра начнет формироваться капля, которая постепенно увеличивает свою массу m_k .

При увеличении массы капли увеличивается сила тяжести, которая равна $m_k g$, где g – ускорение свободного падения. Кроме силы тяжести, на каплю действует сила F_p , вызванная давлением столба жидкости высотой h , как показано на рисунке 1,

$$F_p = P \cdot S = gh\rho \cdot S,$$

где ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; S – площадь сечения капилляра. Площадь сечения капилляра равна

$$S = \pi d^2 / 4,$$

где d – диаметр выходного отверстия капилляра.

Каплю будет удерживать сила поверхностного натяжения F_σ , действующая на ее поверхность со стороны поверхности иглы.

В момент отрыва капли от капилляра сила поверхностного натяжения F_σ уравнивает силу тяжести $m_k g$ и силу давления столба жидкости:

$$F_\sigma = m_k g + F_p.$$

Из приведенных формул следует, что коэффициент поверхностного натяжения:

$$\sigma = \frac{m_k \cdot g + g\rho h \cdot \frac{\pi d^2}{4}}{\pi \cdot d}. \quad (1)$$

Чтобы определить массу капли m_k , нужно посчитать, какое количество капель воды N соответствует определенному объему воды V . Масса одной капли при $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ (плотность воды):

$$m_k = \frac{\rho \cdot V}{N}. \quad (2)$$

Порядок выполнения работы

Работу нужно выполнять вдвоем – один из студентов считает капли, другой – определяет объем вытекающей жидкости по шкале мерного стакана.

1. Подставьте под бюретку пустой мерный стакан. Наполните бюретку водой, установите капельный режим вытекания воды из бюретки.

2. Определите высоту столба жидкости над каплей h .

3. Подсчитайте число капель в объеме 5 мл вытекающей жидкости. Повторите измерения 5 раз.

4. Рассчитайте для каждого случая массу капли по формуле (2), коэффициент поверхностного натяжения воды по формуле (1), его среднее значение и погрешность измерений по методу расчета погрешности прямых измерений.

5. Результаты измерений и расчетов представьте в таблице.

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5}{5}, \Delta\sigma_i = |\sigma_{cp} - \sigma_i|,$$

$$\Delta\sigma = 2,8 \cdot \sqrt{\frac{\Delta\sigma_1^2 + \Delta\sigma_2^2 + \Delta\sigma_3^2 + \Delta\sigma_4^2 + \Delta\sigma_5^2}{5 \cdot (5 - 4)}}.$$

№	V	N	m _K	h	σ	σ _{cp}	Δσ _i	(Δσ _i) ²	(Δσ) _{cp}	ε
Ед. изм.										
1										
2										
3										
4										
5										

Контрольные вопросы

1. В каких агрегатных состояниях могут находиться вещества?
2. Какими особенностями обладает вещество в жидком состоянии?
3. Чему равна и как направлена сила поверхностного натяжения?
4. Свободная энергия напряженной поверхности жидкости – что это такое?
5. Что такое коэффициент поверхностного натяжения? От чего зависит величина коэффициента натяжения жидкости? Единицы измерения.
6. Смачивание и несмачивание – что это такое, когда возникают? Какой может быть поверхность жидкости в капилляре? На какую высоту поднимается жидкость в капилляре? Сформулируйте закон Жюрена.
7. Как объяснить влияние поверхностно-активных веществ на поверхностное натяжение?
8. Каким образом можно измерить поверхностное натяжение жидкости в данном методе, если используемый сосуд не градуирован по объему?

Лабораторная работа № 1.1. Определение и исследование активного сопротивления проводников

Цель работы: ознакомиться с методом опытного определения омического сопротивления проводника при помощи амперметра и вольтметра; измерить сопротивления двух резисторов, их последовательного и параллельного соединения; убедиться в справедливости правил для расчета сопротивлений последовательного и параллельного соединений проводников.

Приборы и материалы: источник постоянного тока, амперметр многопредельный, вольтметр многопредельный, резисторы, сопротивление которых нужно определить, соединительные провода.

Электрический ток – это направленное движение зарядов. При движении зарядов в веществе на их пути встречаются препятствия, действие которых характеризуется с помощью специальной физической величины – сопротивления.

Сопротивление – это физическая величина, характеризующая способность элемента электрической цепи препятствовать протеканию тока. Различают активное и реактивное сопротивления. Реактивное сопротивление бывает двух видов – емкостное и индуктивное, и возникает только при протекании через цепь переменного тока. Активное сопротивление обусловлено взаимодействием движущихся зарядов с колеблющимися ионами и примесями веществ и возникает при протекании постоянного и переменного тока.

Активное сопротивление R металлических проводников определяется величиной удельного сопротивления ρ , которое характеризует материал проводника, прямо пропорционально длине проводника ℓ и обратно пропорционально площади его поперечного сечения s

$$R = \rho \frac{\ell}{s}.$$

Единица измерения сопротивления – Ом, удельного сопротивления – Ом·м.

Активное сопротивление проводников линейно возрастает с увеличением температуры, так как амплитуда колебаний ионов в узлах кристаллической решетки увеличивается, и они во все большей степени мешают направленному движению электронов:

$$\rho = \rho_0 \alpha T,$$

где ρ_0 – удельное сопротивление проводника при температуре 273К; α – температурный коэффициент сопротивления, зависящий от материала проводника; T – температура по шкале Кельвина.

Сопротивление полупроводников, напротив, с увеличением температуры уменьшается экспоненциально, так как при увеличении температуры полупроводника увеличивается число носителей тока – электронов и дырок:

$$R = R_0 \cdot e^{\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right)},$$

где ΔW – энергия активации электронов (для собственных полупроводников – ширина запрещенной зоны); k – постоянная Больцмана; $e = 2,73$ – основание натуральных логарифмов.

Закон Ома для участка цепи – сила тока на участке цепи прямо пропорциональна падению напряжения на этом участке и обратно пропорциональна сопротивлению участка цепи:

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

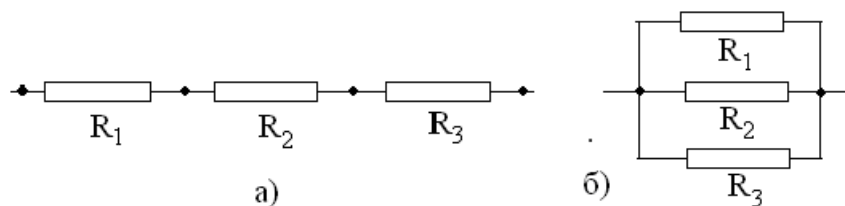


Рисунок 1 – Последовательное (а) и параллельное (б) соединение проводников

При последовательном соединении проводников сила тока на всех участках цепи одинакова; падение напряжения равно сумме падений напряжения на отдельных участках цепи; сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных участков цепи:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2 = I, \\ U &= U_1 + U_2, \\ R &= R_1 + R_2. \end{aligned} \quad (2)$$

При параллельном соединении проводников – падение напряжения на всех участках цепи одинаково; сила тока равна сумме сил тока в отдельных участках цепи; величина, обратная полному сопротивлению цепи, равна сумме обратных сопротивлений отдельных участков цепи:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= U_2 = U \\
 I &= I_1 + I_2 \\
 \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \\
 R &= \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Отсюда следует:

- для измерения величины силы тока амперметр включается в цепь последовательно с исследуемым участком;
- для измерения падения напряжения на участке цепи вольтметр включается в цепь параллельно исследуемому участку.

Из закона Ома для участка цепи следует возможность определить сопротивление участка цепи, измерив силу тока и падение напряжения на участке цепи:

$$R = \frac{U}{I} . \tag{4}$$

В лабораторной работе вам необходимо определить сопротивления двух резисторов с помощью амперметра и вольтметра. Определить сопротивления схем с последовательным и параллельным соединением этих резисторов и сравнить полученные результаты с расчетом по правилам расчета сопротивлений при последовательном и параллельном соединении.

Описание экспериментальной установки

Электрическая схема для измерения сопротивлений при последовательном соединении двух сопротивлений показана на рисунке 2. Она состоит из источника постоянного тока, амперметра I, вольтметров U и U₂, резисторов R₁ и R₂.

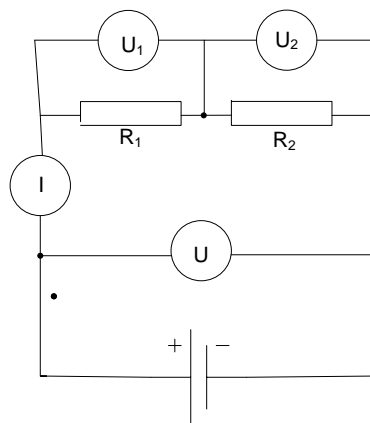


Рисунок 2 – Схема последовательного соединения сопротивлений

Электрическая схема для измерения общего сопротивления при параллельном соединении двух сопротивлений показана на рисунке 3.

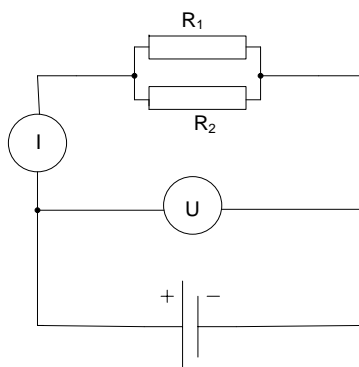


Рисунок 3 – Схема параллельного соединения сопротивлений

Порядок выполнения работы

1. Приготовьте таблицы для записи результатов измерений и расчетов.

2. Для определения сопротивления первого резистора переключите тумблер V_K в положение «ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО». Снимите показания вольтметров U_1 и U_2 и тока в цепи. Результаты занесите в таблицу 1. Вычислите значения U по формуле $U = U_1 + U_2$.

3. По формуле (4) рассчитайте сопротивления резисторов R_2 и R_1 , их средние значения R_{1cp} и R_{2cp} , среднеквадратичные погрешности ΔR_{1cp} и ΔR_{2cp} .

Таблица 1

	U_1	U_2	U	I	R_1	R_{1cp}	ΔR_{1cp}	R_2	R_{2cp}	ΔR_{2cp}
Ед. изм.										
1										
2										
3										
4										
5										

Для определения сопротивления параллельного соединения резисторов переведите тумблер V_K в положение «ПАРАЛЛЕЛЬНО».

Выполните измерения напряжения U_{II} , силы тока I , найдите по формуле (4) значения общего сопротивления R'' при параллельном соединении сопротивлений R_1 и R_2 . Результаты измерений и расчетов представьте в таблице 2. Вычислите R_T'' – предполагаемое (теоретическое) значение сопротивления параллельного соединения резисто-

ров R_1 и R_2 рассчитывается по правилам для параллельного соединения по формуле (3) на основании данных таблицы 1. Для сравнения результатов рассчитайте разницу значений ($R_{cp}'' - R_T''$).

Таблица 2

№ п/п	Параллельное соединение						
	I	U_{II}	R''	R''_{cp}	$\Delta R''_{cp}$	R_T''	$R_{cp}'' - R_T''$
Ед. изм.							
1							
2							
3							
4							
5							

Запишите результаты работы и сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения силы тока, электрического напряжения, электродвижущей силы источника тока и сопротивления. Укажите их размерность в системе СИ.
2. Запишите формулу расчета сопротивления металлического проводника. В каких единицах измеряется сопротивление и удельное сопротивление в системе СИ?
3. Как зависит сопротивление металлов и полупроводников от температуры? Объясните их отличие.
4. Запишите законы Ома для участка цепи, для неоднородного участка цепи, для замкнутой цепи.
5. Последовательное и параллельное соединение проводников – нарисуйте электрическую схему и запишите правила для расчета силы тока, напряжения и сопротивления.
6. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца для постоянного тока.
7. Что называется мощностью электрического тока?

Лабораторная работа № 16. Определение отношения молярных теплоемкостей воздуха методом Клеманса-Десорма

Цель работы: изучить адиабатно-изохорно-изотермический процессы и определить отношения теплоемкостей воздуха $\frac{C_p}{C_v} = \gamma$.

Приборы и материалы: стеклянный баллон, насос, манометр, кран и клапан.

Теплоемкость C равна количеству теплоты dQ , которую необходимо передать телу для повышения его температуры на 1 градус, или:

$$C = \frac{dQ}{dT}.$$

Различают удельную и молярную теплоемкости физических тел.

Удельная теплоемкость C равна количеству теплоты, которое необходимо передать телу массой в 1 кг для повышения его температуры на 1 градус, или:

$$C = \frac{dQ}{mdT},$$

где m – масса вещества.

Молярная теплоемкость равна количеству теплоты, которое необходимо передать 1 моли вещества для повышения его температуры на 1 градус, или:

$$C = \frac{dQ}{\nu dT},$$

где ν – количество вещества.

Различают молярные теплоемкости при постоянном давлении C_p и постоянном объеме C_v . В случае идеального газа значения C_p и C_v зависят от числа степеней свободы молекулы этого газа i , и их значения устанавливаются из формул:

$$C_v = \frac{i}{2}, \quad C_p = \frac{i+1}{2}.$$

Для анализа различных процессов, происходящих в газах, используется величина $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$, которая называется показателем адиабаты. Для идеального газа γ определяется формулой Майера:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+1}{i}.$$

По значению γ можно определить, из какого сорта молекул состоит газ. Оно входит в уравнение Пуассона, которое описывает адиабатическое расширение газа постоянной массы в квазистатическом процессе:

$$PV^\gamma = \text{const.}$$

Экспериментальная установка. Методика эксперимента

Экспериментальная установка для измерения γ воздуха показана на рисунке 1. Она состоит:

из стеклянного баллона объемом V_0 , который сообщается с насосом и U -образным манометром M , заполненным водой, со шкалой, показывающей давление в миллиметрах водного столба;

пульта управления с двумя кнопками: «насос», при нажатии на которую воздух накачивается в баллон, и «кран», при нажатии на которую воздух выпускается из баллона.

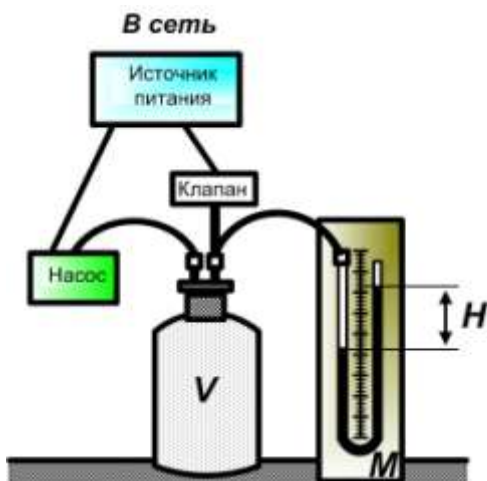


Рисунок 1 – Схематическое изображение лабораторной установки:
 V – стеклянный баллон;
 M – манометр

В баллон при помощи насоса накачивают небольшое количество воздуха. Давление газа повысится $P_0 + \Delta P$, о чем можно судить по разности уровней жидкости в манометре.

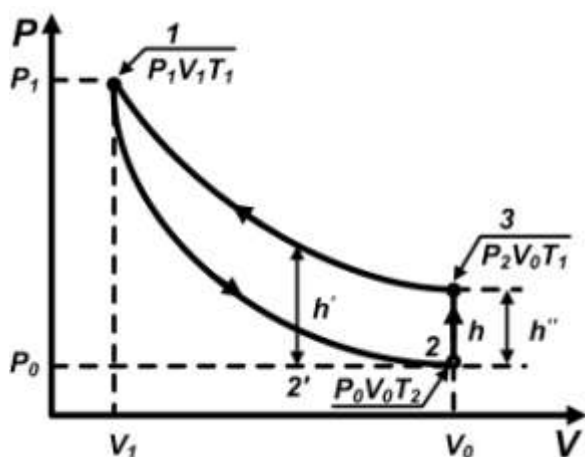


Рисунок 2 – Графики зависимости давления от объема:
 кривая 1-2 – адиабатное расширение;
 линия 2 – изохорическое нагревание;
 кривая 1-3 – изотермическое сжатие

При сжатии воздуха его температура повысится. Поэтому для определения разности уровней жидкости в манометре H необходимо подождать 3 мин, пока температура воздуха внутри баллона сравняется с температурой комнаты благодаря теплопроводности стенок баллона. Обозначим через T_1 абсолютную температуру комнаты, через P_1 – давление газа внутри баллона.

Тогда первое состояние газа характеризуется параметрами P_1 , V_1 , T_1 . Если теперь быстро открыть кран K , то воздух в баллоне будет расширяться и займет объем всего баллона V_0 . Так как процесс расширения в баллоне протекает очень быстро (адиабатически), то газ охладится до температуры T_2 , которая ниже комнатной: $T_2 < T_1$. Давление в баллоне станет равным атмосферному давлению P_0 . Это заметно по манометру, так как уровни жидкости в манометре сравняются. В этот момент кран K закрывают.

Второе состояние газа характеризуется параметрами P_0 , V_0 , T_2 . Это состояние газа очень непродолжительно. Охладившийся воздух в баллоне будет нагреваться, пока его температура не сравняется с температурой окружающей среды в течение 3 мин, приняв вновь значение температуры комнаты T_1 . Вследствие этого давление в баллоне возрастает до величины P_2 , которая больше атмосферного давления на отсчитанную по манометру разность h , т.е. $P_2 = P_0 + h$. Объем воздуха можно считать тем же, что и во втором состоянии, т.е. V_0 , так как расширение воздуха будет очень незначительным.

Третье состояние газа характеризуется параметрами P_2 , V_0 , T_1 . Переход из второго состояния в третье произошел изотермически, а кривая 1-3 является изотермой, для которой справедливо уравнение Бойля-Мариотта:

$$P_1V_1 = P_2V_0.$$

Переход из точки 1 в точку 2 – адиабатический, поэтому справедливо уравнение Пуассона

$$P_1V_1^\gamma = P_0V_0^\gamma.$$

Решая совместно эту систему уравнений относительно искомой величины γ , получим формулу для расчета этой величины

$$\gamma = \frac{H}{H - h}. \quad (1)$$

Для определения γ необходимо знать избыточное давление в баллоне до адиабатического расширения газа H и его избыточное давление после изохорического нагревания h .

Порядок выполнения работы

1. Включите насос в сеть. Внимание! При работе насоса следите, чтобы жидкость из манометра не выливалась!

2. Нажмите и удерживайте кнопку «насос», накачивайте воздух в баллон до тех пор, пока разность уровней в манометре не будет равна 200-250 мм.

3. Отпустите кнопку «насос», нагнетание воздуха прекратится. Через 2-3 мин, когда давление в баллоне перестанет изменяться, отсчитайте показание манометра – это будет величина H (см. рис. 1).

4. Откройте кран и резко выпустите газ из баллона (*адиабатное расширение*). Кран нажатием кнопки держать открытым до тех пор, пока столбы жидкости в двух коленах манометра встанут напротив друг друга. Как только давление в коленах станет равным друг другу, кран закройте.

5. Ждите 3 мин, пока жидкость в коленах не перестанет изменяться со временем. Измерьте давление h .

6. Измерения согласно пунктам 1-5 повторите пять раз. Полученные значения H и h запишите в таблицу.

7. Рассчитайте значение γ_i по формуле (1). Найдите среднее значение γ_{cp} и запишите в таблицу.

8. Найдите среднеквадратичную погрешность σ_γ по формуле для прямых измерений, умножьте на коэффициент Стьюдента ($t \approx 3$) и получите абсолютную погрешность измерения $\Delta\gamma$.

№	H	h	γ	γ_{cp}	$\Delta\gamma_i$	$(\Delta\gamma_i)^2$	$\Delta\gamma_{cp}$	ε
Ед. изм.								
1								
2								
3								
4								
5								

Контрольные вопросы

1. Запишите уравнение Клайперона-Менделеева и поясните смысл всех входящих в него величин.
2. Перечислите основные изопроцессы в идеальных газах.
3. Что называется удельной, молярной теплоемкостями? Каковы единицы их измерения? Что понимают под теплоемкостями C_p и C_V ? Какая из теплоемкостей C_p и C_V больше и почему?
4. Какой процесс называется адиабатическим? Запишите уравнение Пуассона. Что происходит с внутренней энергией газа при адиабатическом процессе?
5. Как практически может быть реализован адиабатический процесс?
6. Какие газовые процессы наблюдаются при проведении опыта?
7. Что такое число степеней свободы? Как это число связано с γ ? Зная γ (из опыта), рассчитайте число степеней свободы молекул воздуха.

Лабораторная работа № 13. Определение длины монохроматической световой волны с помощью дифракционной решетки

Цель работы: определить длину волны монохроматического света для различных участков спектра (красного, зеленого, синего и т. д.).

Приборы и материалы: источник света, набор светофильтров, дифракционная решетка.

Дифракцией называется огибание волнами препятствий, соизмеримых с длиной волны.

Для наблюдения дифракции света в спектральном анализе широко используется *дифракционная решетка*. В простейшем случае она представляет собой ряд параллельных между собой щелей одинаковой ширины X , разделенных непрозрачными для света участками одинаковой ширины Y . Величина $d = X + Y$ – *постоянная решетки*, или ее *период*.

Принципиальная схема установки для наблюдения дифракции света представлена на рисунке 1. Немонохроматический (белый) свет от источника 1, проходя через оптическую систему конденсора 2, освещает щель 3, расположенную на фокусном расстоянии линзы 4, с помощью которой получают параллельный пучок света. На пути полученного пучка ставится дифракционная решетка 5 и светофильтр 6. На решетке происходит дифракция, а, пройдя светофильтр, свет становится монохроматическим. Линза 7 сортирует лучи по углу α выхода их из решетки, собирая все параллельные лучи по углу α в пучок с одинаковым наклоном α в одну точку на экране 8. Если используется длинная щель, то пучок на экране собирается в линию, параллельную щели. В этом случае каждому значению α на экране соответствует линия.

Встречаясь на экране, лучи интерферируют, усиливая или ослабляя интенсивность освещенности I .

На рисунке 1 справа приведена диаграмма распределения интенсивности света I на экране: максимумы интенсивности чередуются с ее минимальными значениями. Дифракционные максимумы обозначаются числом k , которые называются порядком максимума. Самый яркий центральный максимум имеет порядок $k = 0$. Слева и справа от него находятся максимумы с порядком $k = \pm 1$, следующие максимумы имеют порядок $k = \pm 2$ и т. д.

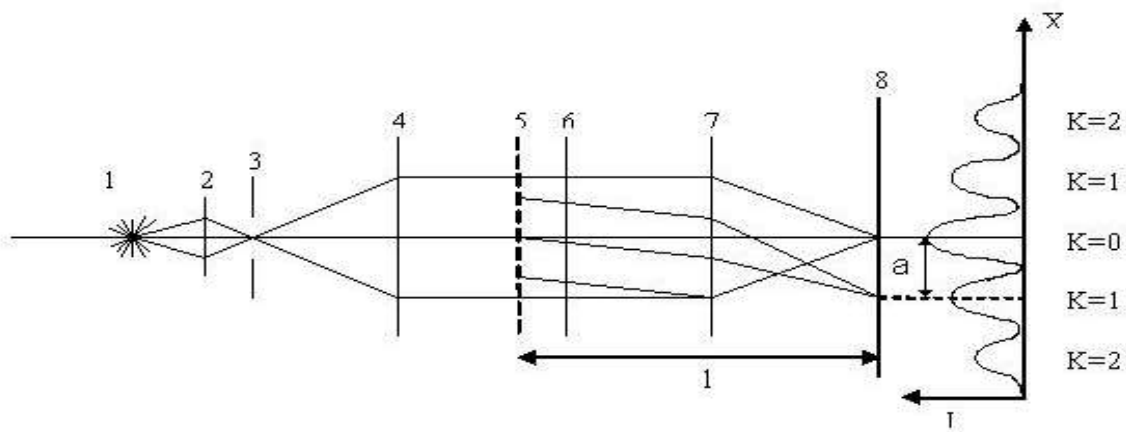


Рисунок 1 – Оптическая схема для наблюдения дифракции света

Для одномерной дифракционной решетки, если свет падает на решетку нормально к ее плоскости (рис. 2), для максимумов будет выполняться условие:

$$d \sin \alpha = \pm k \lambda, \quad (1)$$

где λ – длина волны света; d – период дифракционной решетки; k – порядок дифракционных максимумов.

Если свет падает под углом β (рис. 3) к нормали плоскости решетки, то для максимумов будет выполняться следующее условие:

$$d(\sin \beta - \sin \alpha) = \pm k \lambda. \quad (2)$$

При $\frac{\lambda}{d} \ll 1$ дифракционная картина совпадает с дифракционной картиной, наблюдаемой при нормальном падении световой волны на решетку, когда последняя имеет как бы уменьшенный период:

$$d' = d \cos \beta. \quad (3)$$

Используя схему рисунка 2, из геометрических соображений и условия (1) можно вывести следующую рабочую формулу для определения длины световой волны:

$$\lambda = \frac{da}{k\sqrt{\ell^2 + a^2}}, \quad (4)$$

где a – расстояние от центрального максимума ($k = 0, \alpha = 0$) до максимума порядка k ; ℓ – расстояние от дифракционной решетки до экрана.

В случае асимметрии оптической системы установки и наличия изгиба волнового фронта световой волны условие (3) может существенно исказить результаты измерений с применением формулы (4).

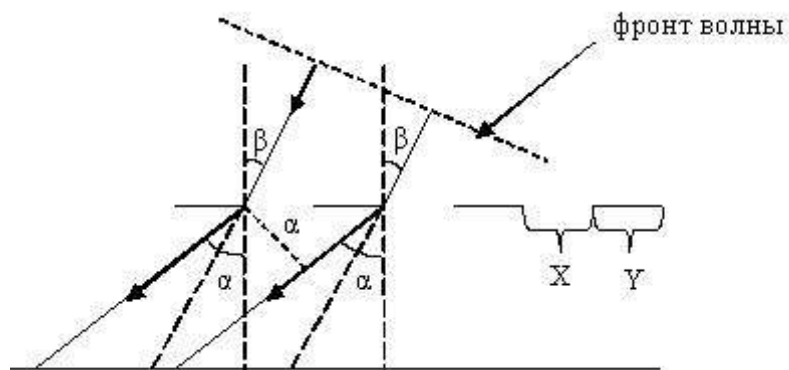


Рисунок 2 – Дифракция света, падающего на решетку перпендикулярно к ее плоскости

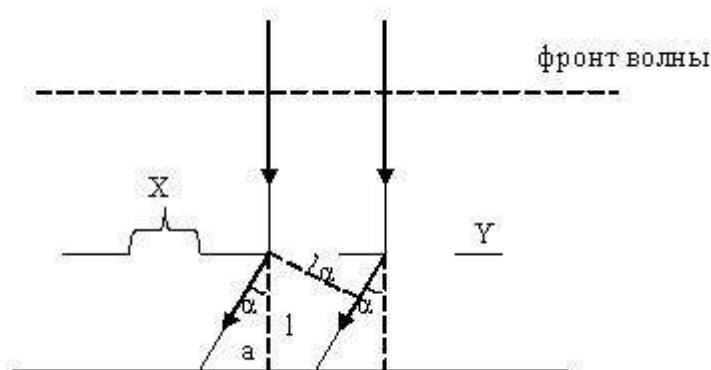


Рисунок 3 – Дифракция света, падающего под углом к нормали плоскости решетки

Порядок выполнения работы

1. Включите лазер и добейтесь четкого изображения на экране дифракционной картины с наличием максимумов порядка $k = 0$, $k = \pm 1$ и $k = \pm 2$, $k = \pm 3$.
2. Измерьте расстояние l от дифракционной решетки до экрана.
3. Измерьте расстояние a и a' от центрального максимума до максимумов k – порядка слева и справа соответственно.
4. Рассчитайте длину световой волны по формуле

$$\lambda = \frac{da_{cp}}{k\sqrt{l^2 + a_{cp}^2}} \quad (5)$$

для каждого установленного светофильтра. В установке используется дифракционная решетка с периодом $d = 0,01$ мм.

5. Повторите опыт для трех разных l .
6. Для расчета ошибки $\Delta\lambda_{cp}$ при измерении длины волны используйте формулу

$$\Delta\lambda_{cp} = t_{\alpha} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta\lambda_i^2}{n(n-1)}}, \quad (6)$$

где n – число измерений; $\Delta\lambda_i = |\lambda_{cp} - \lambda_i|$ – абсолютные ошибки каждого отдельного измерения; t_{α} – коэффициент Стьюдента.

7. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

ℓ мм	k	a , мм	a' , мм	a_{cp} , мм	λ_i , мм	λ_{cp} , мм	$\Delta\lambda_i$ мм	$(\Delta\lambda_i)^2$	$\Delta\lambda_{cp}$ мм
	1								
	2								
	3								
	1								
	2								
	3								
	1								
	2								
	3								

Контрольные вопросы

1. Что понимается под двойной природой света?
2. Какие явления отражают волновые свойства света?
Корпускулярные?
3. Какие величины и по какому закону колеблются в световой волне?
4. Что называется волновой поверхностью и волновым фронтом в световой волне?
5. Какие волны называются когерентными?
6. Дайте определение явлениям интерференции и дифракции и каким образом они отражают волновую природу света?
7. Используя формулу (1) и схему рис. 2, выведите формулу (4).
8. Опираясь на соотношение (3) и полученные в вашем опыте данные, оцените угол наклона фронта световой волны к плоскости дифракционной решетки в используемой установке.
9. Чему равна длина волны в мкм и нм?

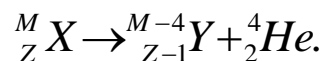
Лабораторная работа № 20. Изучение альфа-излучения

Цель работы: определить длину пробега α -частиц и их энергию.

Приборы и материалы: радиометр α -частиц ФПК-03; радиоактивный препарат плутоний ${}^{239}_{94}\text{Pu}$; масштабная линейка.

Самопроизвольный процесс превращения одних элементов в другие, сопровождаемый излучением, называется *радиоактивным распадом*. Исследование радиоактивного излучения с помощью магнитных и электрических полей позволило выяснить природу этого излучения.

Одна из частей этого излучения – α -излучение – представляет собой поток положительно заряженных ядер гелия ${}^4_2\text{He}$, движущихся с большими скоростями. Ядерная реакция, сопровождаемая α -излучением, называется α -распадом:



Например, ${}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{231}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}.$

Альфа-частица, обладая большой массой, при движении в веществе ионизирует встречные атомы. Кроме того, отдавая часть своей энергии встречным атомам, она может вызвать переход электронов встречных атомов на более высокие энергетические уровни, не отрывая их от ядра. В результате всех этих процессов α -частица теряет свою энергию и затормаживается до тепловых скоростей молекул. Тогда, захватив два электрона, α -частица превращается в нейтральный атом гелия. Расстояние R , которое проходит α частица до превращения в атом гелия, называется *пробегом* α -частицы.

У различных радиоактивных элементов пробеги α -частиц в воздухе меняются в пределах от 2 до 10 см. Длина пробега α -частицы зависит от ее начальной энергии. Все α -частицы вылетают из ядра данного радиоактивного атома с одинаковой скоростью и энергией, но, вследствие флуктуации плотности воздуха, потерь энергии на ионизацию, возбуждения молекул газа и т. п., имеют несколько различную длину пробега. Поэтому пробег α -частиц несколько различается друг от друга и статистически колеблется около среднего значения $R_{\text{ср}}$. Отклонение величины R от среднего значения обычно не превосходит 4 %. Помимо среднего пробега α -частиц, существует экстраполированное значение пробега $R_{\text{экт}}$.

Особенности движения α -частиц в воздухе (прямолинейность движения и одинаковая длина пробега для всех частиц с одинаковой энергией) позволяют определить энергию α -частиц по длине их пробега в воздухе. Спектр α -излучения (рис. 1) – монохроматический, т. е. α -частицы, вылетая из ядер, как правило, обладают одинаковой энергией.

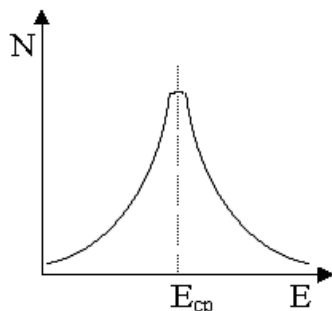


Рисунок 1 – Спектр альфа-излучения

Существует эмпирическое соотношение между длиной пробега α -частиц R , выраженной в см, и их энергией E , выраженной в МэВ:

$$R = 0,309 \cdot E^{1,5},$$

$$E = \sqrt[3]{(R/0,309)^2}. \quad (1)$$

Описание прибора и метода измерения

Работа выполняется на установке ФПК-03 (рис. 2).

1. Подключите сетевой шнур измерительного устройства к сети и включите установку выключателем «СЕТЬ» на задней панели измерительного устройства (при этом на индикаторе должно установиться значение time: 10,0 s и режим установки времени (set)).

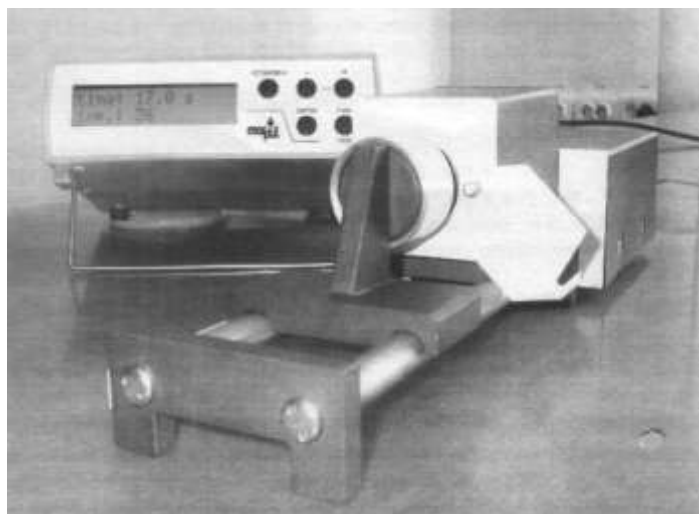


Рисунок 2 – Установка для определения длины пробега частиц в воздухе (ФПК-03)

2. Дайте прогреться в течение 5 мин. Нажмите кнопку «СБРОС», при этом во всех разрядах должны индицироваться нули.

3. Ослабьте винты защитной шторки счетчика, откиньте ее, открыв рабочую поверхность счетчика (при этом и в дальнейшей работе соблюдайте осторожность, чтобы не повредить рабочую поверхность счетчика), и закрепите в таком положении с помощью винта.

4. Получите у преподавателя держатель источника с источником излучения. Держатель образца установите на минимально возможном расстоянии от счетчика.

5. Установите время измерения 60 с, для чего нажмите кнопку «УСТАНОВКА» и кнопками «+» и «-» установите необходимое время измерения (при этом при кратковременном нажатии происходит установка единиц секунд, а при длительном – установка десятков секунд, переключение диапазонов 99,9 и 999 с происходит автоматически).

6. Нажмите кнопку «ПУСК», после чего должны появиться и нарастать показания количества частиц и секунд. По истечении установленного времени измерение автоматически прекратится. На индикаторе должны зафиксироваться значения времени измерения и количества частиц. Запишите показания в таблицу. Нажмите кнопку «СБРОС».

7. Измените расстояние между источником и счетчиком на 2 мм и повторите измерения (и так до значений 30–40 имп/мин).

8. Все измерения повторите по два раза. Для каждого расстояния найдите среднее арифметическое значение числа импульсов $N_{\text{ср}}$.

9. По окончании работы необходимо:

- нажать кнопку «СБРОС»;
- выключить питание установки переключателем «СЕТЬ» (на задней панели измерительного устройства);
- закрыть рабочую поверхность счетчика защитной шторкой. (Соблюдать осторожность, чтобы не повредить поверхность счетчика!);
- снять со скамьи держатель источника с источником излучения и сдать преподавателю.

10. Постройте график зависимости среднего числа импульсов $N_{\text{ср}}$, созданных α -частицами за 1 мин, от расстояния α -препарата до экрана l (мм), как на рисунке 3, по данным таблицы.

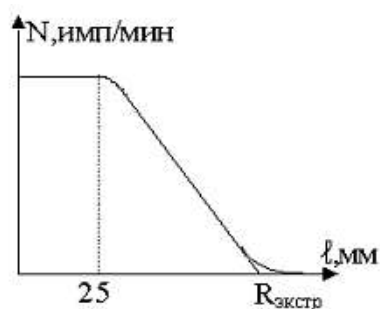


Рисунок 3 – Поглощение альфа-излучения в воздухе

Примечание: при построении графика необходимо учитывать расстояние, проходимое α -частицей в защитной фольге счетчика. Это расстояние эквивалентно слою воздуха толщиной в 25 мм и называется *воздушным эквивалентом*.

11. Из графика определите длину пробега α -частицы, причем за длину пробега принимается так называемое экстраполированное значение $R_{\text{экст}}$, которое определяется точкой пересечения продолжения прямолинейной части кривой с осью абсцисс (см. рис. 3).

12. Подставив в (1) значения $R_{\text{экст}}$, подсчитайте значение энергии E α -частицы.

l , мм	N , имп/с	$N_{\text{ср}}$, имп/с	$R_{\text{экст}}$, см	E , МэВ
0				
2				
4				
6				
8				
10				
12				
14				
16				
18				

Контрольные вопросы

1. Как устроен атом?
2. Из каких частиц состоит ядро атома? Что представляют собой эти частицы?
3. Что понимается под изотопами?
4. Что такое естественная радиоактивность? Запишите уравнение радиоактивного распада. Что понимается под периодом полураспада?
5. Какие существуют виды распада ядер?
6. Что понимается под ядерной реакцией?
7. Запишите и объясните реакцию α -распада. Что представляет собой α -излучение?
8. Что называется длиной пробега α -частицы? Объясните метод определения длины пробега и энергии α -частиц.
9. Почему спектр α -частиц является монохроматическим?

Лабораторная работа № 26. Исследование зависимости энергетической светимости абсолютно черного тела от его температуры

Цель работы: исследовать модель абсолютно черного тела (печь) методом измерения температуры контактным и оптическим способами; определить постоянную Стефана-Больцмана.

Приборы и материалы: установка для изучения абсолютно черного тела ФПК-11: объект исследования – печь, измерительное устройство, термостолбик.

Электромагнитное излучение, свойственное всем телам, температура которых отлична от 0 К, называется тепловым. С повышением температуры интенсивность испускаемой энергии возрастает. По закону Стефана-Больцмана полная энергия, излучаемая абсолютно черным телом (АЧТ) за одну секунду с единицы поверхности, пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$R_0(T) = \sigma T^4, \quad (1)$$

где $R_0(T)$ – энергетическая светимость абсолютно черного тела (АЧТ), т. е. мощность излучения с единицы площади поверхности тела [Вт/м²]; T – абсолютная температура тела; σ – постоянная Стефана-Больцмана [Вт/(м²·К⁴)].

Установка состоит из объекта исследования (печи), измерительного устройства и термостолбика, выполненных в виде конструктивно законченных изделий, устанавливаемых на лабораторном столе и соединяемых между собой кабелями.

Принцип действия установки основан на лабораторном исследовании модели АЧТ методом измерения температуры контактным и оптическим способами. С помощью термопары контактным способом измеряется температура в печи (температура в градусах Цельсия выводится на «индикатор °С» панели измерительного прибора). С помощью термостолбика измеряется приращение потока излучения (мощности излучения), выходящего из печи. Приращение потока излучения (мощности излучения) пропорционально напряжению с термостолбика.

Объект исследования (печь) представляет собой модель АЧТ и выполнен как закрытая термоизолированная электропечь с отверстием на передней стенке. В его состав входят:

1) устройство нагревательное, встроенное в теплозащитный корпус;

2) термопара для измерения температуры внутри печи контактным способом (при этом измеряется разность температур горячего и холодного спаев, и для получения абсолютной температуры необходимо к измеренному значению прибавить значение температуры в помещении);

3) регулируемый источник питания, предназначенный для разогревания печи до 8000 °С и регулирования скорости нагрева;

4) вентилятор для ускорения остывания печи после нагрева.

Термостолбик представляет собой датчик потока излучения (мощности излучения) и имеет кабель для подключения к измерительному устройству. С помощью стойки термостолбик устанавливается на штативе. В качестве термочувствительного элемента применяется батарея хромель-копелевых термопар. Возникающая в термопарах термостолбика термо-ЭДС прямо пропорциональна мощности теплового излучения печи:

$$R(T) = \frac{\varepsilon}{ks}, \quad (2)$$

где ε (мВ) – термо-ЭДС термостолбика; $s = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ – площадь излучающей поверхности печи; $k = 0,54 \text{ мВ/Вт}$ – коэффициент пропорциональности. Значение термо-ЭДС в милливольтках выводится на переднюю панель измерительного устройства «индикатор мВ». Формула для расчета постоянной Стефана-Больцмана:

$$\sigma = \frac{R(T)}{T^4}. \quad (3)$$

Ознакомьтесь с лабораторной установкой ФПК-11. На передней панели печи размещены: отверстие для выхода излучения печи; выключатель СЕТЬ – предназначен для включения/выключения питания печи; выключатель ВЕНТ – предназначен для включения питания вентилятора при охлаждении печи.

Примечание: работа печи возможна только при подключенном к ней и включенном измерительном устройстве.

На верхней крышке печи расположена ручка регулировки скорости нагрева печи от 0 до максимального значения.

На передней панели устройства измерительного размещены: индикатор мВ – предназначен для индикации напряжения термо-ЭДС

термостолбика; индикатор °С – предназначен для индикации температуры печи.

На задней панели измерительного устройства расположен выключатель СЕТЬ.

Режим работы установки прерывистый, через каждые 2 часа работы делается перерыв на 15-20 мин.

Категорически запрещается нагрев печи до температуры свыше 800 °С.

Порядок выполнения работы

1. Установите термостолбик так, чтобы втулка на передней панели термостолбика вошла в отверстие на передней панели печи. При этом площадь излучателя $s = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

2. Подключите сетевые шнуры объекта исследования и измерительного устройства к сети и включите устройство выключателем «СЕТЬ» на его задней панели. Дайте прогреться в течение 5 мин (при этом на индикаторах °С и мВ должны появиться значение 000 и 0,00 соответственно).

3. Приготовьте таблицу для записи результатов. Запишите значение комнатной температуры t_0 .

4. Включите печь с помощью выключателя «СЕТЬ» (при этом ручка «СКОРОСТЬ НАГРЕВА» должна находиться в положении «МИН»), а для исключения перегрева корпуса печи включите с помощью выключателя «ВЕНТ» вентилятор охлаждения.

5. Установите ручку «СКОРОСТЬ НАГРЕВА» на значение «б». Печь начнет постепенно нагреваться.

6. Когда температура достигнет 100 °С, запишите показания измерительного прибора в таблицу (ε, мВ), и далее через 50 градусов снимите зависимость напряжения термостолбика от температуры в печи до 600 °С. Категорически запрещается нагрев печи до температуры свыше 800 °С.

7. Выключите установку следующим образом:

а) после достижения максимально заданной температуры печи необходимо охладить печь, для чего **повернуть ручку скорости нагрева в положение «MIN» и выключить выключатель «СЕТЬ» на передней панели печи**, при этом начнется охлаждение печи (**вентилятор должен работать**);

k = 0,54 мВ/Вт; s = 7,85·10 ⁻⁵ м ² ; t ₀ =										
№	ε	R	t _{изм}	T	σ	σ _{ср}	Δσ _i	(Δσ _i) ²	Δσ _{ср}	(Δσ _{ср} /σ _{ср})·100%
Ед. изм	мВ	Вт/м ²	°С	К	Вт/(м ² К ⁴)					%
1			100							
2			150							
3			200							
4			250							
5			300							
6			350							
7			400							
8			450							
9			500							
10			550							
11			600							

б) после охлаждения печи до 50 °С выключите питание вентилятора выключателем «ВЕНТ» на лицевой панели печи;

в) выключите измерительную установку выключателем «СЕТЬ» на задней панели измерительного устройства, отключите сетевые вилки измерительного устройства и печи от питающей сети.

8. Пока охлаждается печь, следует приступить к выполнению расчетов:

а) по формуле (2) рассчитайте значение R для каждой температуры;

б) рассчитайте значения абсолютной температуры печи по формуле: $T = t_{изм} + t_0 + 273$ (К), где $t_{изм}$ – показания измерительного прибора; t_0 – комнатная температура;

в) постройте график зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от температуры $R(T)$. Соответствует ли полученная графическая зависимость закону Стефана-Больцмана;

г) по формуле (3) рассчитайте значения постоянной Стефана-Больцмана σ для пяти последних значений температуры (400, 450, 500, 550, 600).

Контрольные вопросы

1. Какое излучение называется тепловым?
2. Какое тело называется абсолютно черным?
3. Что такое спектральная плотность энергетической светимости?
4. Что называется интегральной светимостью?
5. Сформулируйте закон Кирхгофа для излучательной способности тел. Приведите примеры, подтверждающие этот закон.
6. Сформулируйте закон Больцмана для интегральной светимости АЧТ.
7. Сформулируйте закон смещения Вина для спектральной плотности светимости АЧТ. Приведите примеры его практического применения.
8. Устройство пирометра.

Лабораторная работа № 14. Определение концентрации раствора глюкозы поляриметром

Цель работы: определить концентрацию раствора глюкозы в исследуемой жидкости с помощью поляриметра.

Приборы и материалы: поляриметр круговой, набор растворов глюкозы различной концентрации.

С точки зрения электромагнитной теории свет представляет собой поперечную электромагнитную волну, в которой векторы напряженности электрического поля E и магнитного поля H колеблются во взаимно перпендикулярных плоскостях и перпендикулярны направлению распространения волны. Такой вид имеет плоскополяризованная волна. В дальнейшем все рассуждения мы ограничим рассмотрением только направления колебаний вектора E , так как оптические, биологические и другие процессы взаимодействия света с веществом обусловлены электрической составляющей электромагнитной волны.

Обычные источники света являются совокупностью действия огромного числа элементарных источников (атомов и молекул), испускающих свет независимо друг от друга, с разными фазами и направлениями векторов E по отношению к направлению распространения волны. Такой свет называется *естественным*, или *неполяризованным*. Свет, в котором колебания векторов E упорядочены каким-либо образом, называется *частично поляризованным*. Если колебания векторов E происходят только в одной плоскости (*плоскости колебаний*) (при этом вектор H колеблется в перпендикулярной плоскости – *плоскости поляризации*), свет называется *плоскополяризованным*.

Поляризация света наблюдается в ряде явлений: при отражении от диэлектриков, преломлении и при прохождении света через кристаллы определенной симметрии. Например, голубой цвет неба является частично плоскополяризованным. Устройства, с помощью которых из естественного света получают поляризованный свет, называются *поляризаторами*. В составе поляриметра используется два поляризатора. Первый из них (поляризатор) служит для получения поляризованного света, второй (анализатор) – для исследования поляризованного света. В зависимости от относительного положения направлений разрешенных колебаний поляризатора и анализатора интенсивность луча, проходящего через такую систему, будет различной. В случае, когда плоскости колебаний поляризатора (PP) и анали-

затора (АА) составляют между собой некоторый угол α , интенсивность света I , прошедшего через поляризатор и анализатор, определяется законом Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha. \quad (1)$$

Прохождение поляризованных лучей в некоторых кристаллах и растворах органических веществ сопровождается поворотом плоскости колебаний вектора E на некоторый угол (явление вращения плоскости поляризации). Такие вещества называются *оптически активными* (кварц, водные растворы глюкозы, сахара). Оптически активные вещества существуют в природе в двух модификациях: правои или левовращающей. Внешний вид кристаллов таких модификаций практически одинаков, однако они выглядят как зеркальное отражение одного в другой. Обнаружить вращение плоскости поляризации можно с помощью поляриметра, который схематически изображен на рисунке 1.

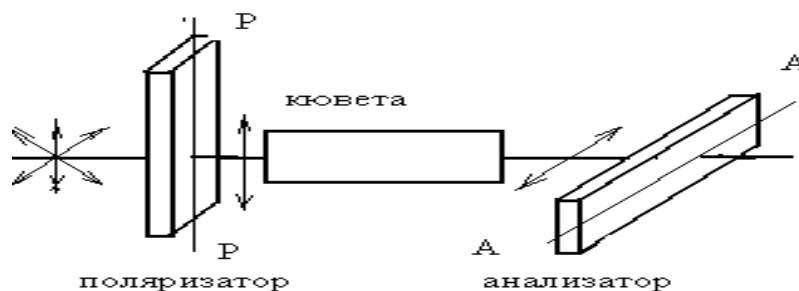


Рисунок 1 – Схема устройства поляриметра

Пусть оси поляризатора (PP) и анализатора (AA) скрещены ($\alpha = 90^\circ$) и не пропускают свет. Поместим между ними кювету с раствором глюкозы, тогда плоскость колебаний луча, вышедшего из поляризатора, будет повернута раствором глюкозы на некоторый угол γ . Свет частично пройдет через анализатор. Чтобы погасить свет, необходимо анализатор повернуть на такой же угол γ вслед за повернутой в растворе плоскостью колебаний луча.

Угол вращения плоскости поляризации в кристаллах зависит от их свойств и пропорционален толщине слоя оптически активного вещества ℓ :

$$\gamma = K\ell, \quad (2)$$

где K – коэффициент удельного вращения.

Для растворов выполняется соотношение

$$\gamma = Kc\ell, \quad (3)$$

где C – концентрация раствора.

Измерив угол вращения плоскости поляризации γ , из уравнения (3) можно определить концентрацию глюкозы в растворе с помощью поляриметра (рис. 2).

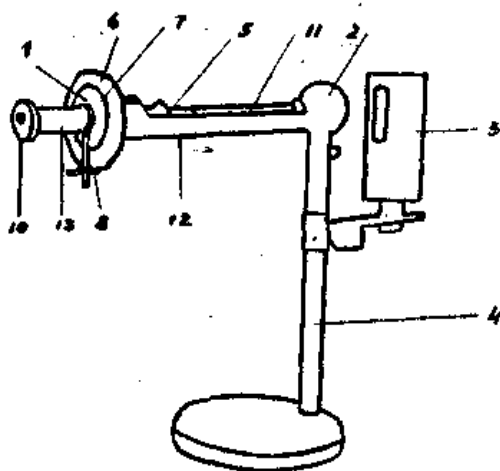


Рисунок 2 – Поляриметр

Поляриметр состоит из головки анализатора 1, поляризационного устройства 2, осветителя 3, штатива 4, трубки для растворов 5. Головка анализатора 1 является основной рабочей частью прибора и состоит из неподвижного лимба 6 и двух нониусов 7, фрикциона 8, анализатора 9, зрительной трубы 10, на которой имеется муфта 13. Муфта служит для установки окуляра на резкость изображения. Головка анализатора соединяется с поляризационным устройством 2 при помощи трубы 12, в которую при измерении вкладывают кювету с раствором. Во избежание проникновения постороннего света вырез в трубе закрывается вращающейся шторкой 11.

На лимбе по часовой стрелке нанесена градусная шкала от 0° до 360° . Внутри лимба нанесено два нониуса, расположенные диаметрально. Нониусы имеют до 20 делений, точность нониуса – $0,05^\circ$. В работе поляриметра применен принцип уравнивания яркостей разделенного на три части поля зрения. Вид поля зрения поляриметра изображен на рисунке 3.

Разделение поля на три части осуществляется введением в оптическую схему прибора кварцевой пластинки, которая занимает только среднюю часть поля зрения. Уравнивание полей происходит вблизи затемнения поля, что соответствует почти полному скрещиванию поляризатора и анализатора. Свет от матовой электрической лампочки, пройдя через поляризатор своей средней частью пучка, проходит через кварцевую пластинку и анализатор, а двумя крайними частями

пучка – только через анализатор. Уравнивание тройного поля зрения производится путем вращения анализатора вокруг горизонтальной оси. Если между анализатором ввести трубку с раствором сахара, то равенство яркостей всех частей поля зрения нарушается, оно может быть восстановлено поворотом анализатора на угол, равный углу поворота плоскости поляризации раствором. Следовательно, разность двух отчетов, соответствующих равномерному затемнению частей поля зрения с раствором и без него, определяет угол вращения плоскости поляризации данного раствора.

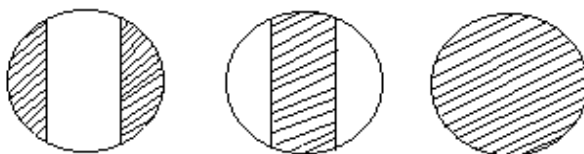


Рисунок 3 – Варианты картины тройного поля окуляра поляриметра

Порядок выполнения работы

1. Включите прибор в сеть переменного тока и тумблером включите лампу. Дайте прибору прогреться 10 мин.

2. Произведите без кюветы определение нулевого отсчета n_0 . Перемещением муфты установите окуляр на ясное видение линий раздела поля. После этого вращением фрикциона поверните анализатор и добейтесь равномерного затемнения тройного поля (см. рис. 3). Сделайте **отсчет угла по нониусу**. Если нулевой штрих нониуса при установке на равномерную затемненность оказался относительно нулевого штриха лимба смещенным по часовой стрелке, то его значение берется со знаком (+), если против часовой стрелки, то со знаком (-). Повторите измерения пять раз. Средняя из пяти отсчетов величина является нулевым отсчетом прибора n_0 .

3. Поместите в прибор трубку с раствором глюкозы известной концентрации C . Путем, описанным выше, установите тройное поле на равномерную затемненность и произведите отсчет следующим образом: определите, на сколько полных градусов повернулся нуль нониуса по отношению к лимбу, затем по штриху нониуса, совпадающего с градусным штрихом лимба, отсчитайте доли градуса. Таких измерений делают не менее пяти и рассчитывают среднее арифметическое значение n . Разность между n и n_0 дает угол вращения плоско-

сти поляризации света раствором глюкозы известной концентрации C . Эта разность будет пропорциональна концентрации раствора и толщине слоя раствора ℓ :

$$n - n_0 = KCl.$$

4. Поместите в поляриметр трубку с раствором глюкозы неизвестной концентрации. Проведите измерения, как в п. 3. Найдите вращение плоскости поляризации раствором глюкозы неизвестной концентрации:

$$n_x - n_0 = KC_x \ell_x.$$

Окончательно концентрацию неизвестного раствора можно рассчитать по формуле

$$C_x = \frac{C\ell(n_x - n_0)}{\ell_x(n - n_0)}.$$

Результаты представить в таблице.

Номер	n_0 , град	ℓ , см	n , град	ℓ_x , см	n_x , град	C_x , %	$C_{\text{хср}}$, %	$\pm\Delta C_{\text{хср}}$, %
1.								
...								

Контрольные вопросы

1. Что собой представляет световая волна? Что такое плоскость поляризации и плоскость колебаний?
2. Какой свет называется естественным, поляризованным, частично поляризованным?
3. Что такое поляризатор и анализатор?
4. Назовите методы поляризации света.
5. Какие среды являются оптически активными?
6. Сформулируйте закон Малюса.
7. Объясните работу поляриметра. Как определять концентрации растворов поляриметром?

Лабораторная работа № 24. Изучение плоскополяризованного света

Цель работы: изучение плоскополяризованного света, проверка закона Малюса.

Приборы и материалы: полупроводниковый лазер, анализатор, фотоприемник (фотодиод), мультиметр.

Свет имеет двойственную природу. В одних явлениях он ведет себя как поток частиц (фотонов), в других – как электромагнитная волна. В данной работе рассматривается явление, в котором проявляются волновые свойства света. Электромагнитная волна – это процесс распространения в пространстве колебаний взаимно обусловленных векторов напряженностей электрического E и магнитного H полей (рис. 1). Видимый свет является электромагнитной волной, длина которой лежит в интервале от 380 до 760 нм. Векторы E и H колеблются во взаимно перпендикулярных плоскостях и перпендикулярно вектору скорости v распространения электромагнитной волны, направленному вдоль светового луча, характеризующего направление волны, и перпендикулярно плоскости волнового фронта. Следовательно, световая волна является *поперечной*.

Подобную волну излучает отдельный атом в одном акте излучения. Действие света на электроны вещества в основном определяется вектором E электромагнитной волны, поэтому его называют **световым вектором**.

Свет, в котором вектор E имеет равновероятные направления колебаний, называется **неполяризованным**, или **естественным**. Естественный свет излучается всеми естественными и большинством искусственных источников света. В этом случае свет испускается одновременно огромным количеством отдельных атомов, причем направления колебаний светового вектора разных атомов ориентированы случайным образом. Следовательно, в результирующей волне колебания светового вектора также ориентированы случайным образом и колебания различных направлений представлены с равной вероятностью.

Поляризованным называется свет, в котором колебания светового вектора E (и магнитного вектора H) упорядочены каким-либо образом. Процесс получения поляризованного света называется **поляризацией**. Если колебания вектора E происходят в одной плоско-

сти, свет называется *плоско-* или *линейно поляризованным*. Свет, в котором имеется некоторое преимущественное направление колебаний вектора E , называется частично поляризованным.

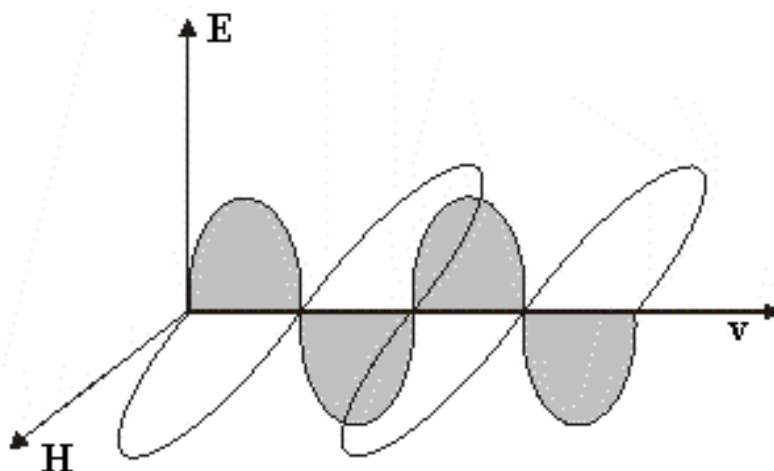


Рисунок 1 – Электромагнитная волна

Поляризация света наблюдается при отражении, преломлении или прохождении света через анизотропные вещества. Всякое устройство, служащее для получения поляризованного света (независимо от физических эффектов, используемых при этом), называется *поляризатором*. Плоскость колебаний вектора E в волне, прошедшей через поляризатор, называется *главной плоскостью поляризатора*. Визуально поляризованный свет нельзя отличить от неполяризованного. Исследование поляризованного света осуществляется с помощью устройства, аналогичного поляризатору и называемого в этом случае *анализатором*.

Если свет проходит через поляризатор и анализатор, причем угол между их плоскостями составляет φ , то выполняется *закон Малюса*

$$I = I_{\Pi} \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

где I – интенсивность света, вышедшего из анализатора; I_{Π} – интенсивность света, вышедшего из поляризатора; φ – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

Если на поляризатор падает естественный свет с интенсивностью I_0 , то закон Малюса запишется следующим образом:

$$I = \frac{I_0}{2} \cos^2 \varphi. \quad (2)$$

Следствием закона Малюса является то, что интенсивность прошедшего света за полный оборот поляризатора достигает два раза максимума и два раза становится равной нулю.

Описание лабораторной установки

В лабораторной установке используется лазер 1, выходное излучение которого является почти линейно поляризованным, его интенсивность соответствует значению I_{Π} в законе Малюса (1).

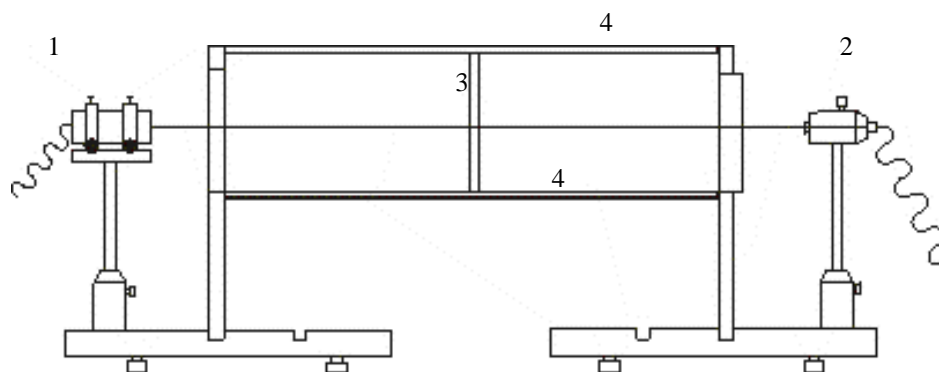


Рисунок 2 – Схема установки для изучения поляризованного света

Угол φ изменяется вращением анализатора 3, расположенного между направляющими рейками 4. Свет, прошедший через анализатор, с интенсивностью I попадает на фотоприемник (фотодиод) 2, подключенный к мультиметру. Показания мультиметра пропорциональны световому потоку, падающему на фотодиод.

Показания мультиметра следует снимать в режиме измерения тока, так как получаемая в этом случае характеристика является линейной. В дальнейшем можно величину силы тока принять равной интенсивности света.

Порядок выполнения работы

1. Установите мультиметр в режиме измерения тока I , для этого провода от фотодиода подключите к мультиметру: черный – в черное гнездо «СОМ», красный – в красное, расположенное рядом с входом «V Ω mA». Выставьте на мультиметре предел измерения: для этого поставьте переключатель в положение «А» 2000 μ A. Если показания мультиметра менее 100, необходимо добиться, чтобы излучение лазера попадало в отверстие фотодиода.

2. Перекройте луч лазера оптически непрозрачным материалом и убедитесь, что темновой ток фотоприемника $I_T = 0$. Установите анализатор в положение, соответствующее $\varphi = 0$. Снимите показания

мультиметра в режиме измерения тока $I_{\text{экс}}$. Затем, поворачивая анализатор через 10° , заполните таблицу. Измерения повторите 2–3 раза. Рассчитайте среднее значение $\langle I \rangle_{\text{экс}}$.

Номер	φ , град	$I_{\text{экс}}$				$\cos^2 \varphi$	$I_{\text{теор}}$
		I_1	I_2	I_3	$\langle I \rangle_{\text{сред}}$		
1	0						
2	10						
...	...						
...	360						

3. Произведите теоретический расчет интенсивности света, прошедшего через анализатор $I_{\text{теор}}$ по закону Малюса (1). За величину $I_{\text{п}}$ взять максимальное показание мультиметра из экспериментальной таблицы.

4. Постройте графики теоретической $I_{\text{теор}}$ и экспериментальной $\langle I \rangle_{\text{экс}}$ зависимостей интенсивности света от угла поворота анализатора φ в полярных координатах с помощью EXCEL.

5. Постройте график зависимости $\langle I \rangle_{\text{экс}} = f(\cos^2 \varphi)$.

6. Объясните полученные результаты. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Какова физическая природа света?
2. Какой свет называется естественным, частично поляризованным, плоско поляризованным?
3. Что такое плоскость поляризации (плоскость колебаний) светового луча?
4. Какой вектор называется световым? Почему?
5. В чем заключается закон Брюстера? Почему свет, отраженный от диэлектрика под углом Брюстера, является плоско поляризованным?
6. Объясните наблюдаемое в опыте изменение интенсивности отраженного от диэлектрика луча света.
7. В чем заключается явление поляризации света?
8. Какие явления используют для получения поляризованного света?
9. Что называется поляризатором, анализатором?
10. Запишите и объясните закон Малюса.
11. Как практически можно отличить плоскополяризованный свет от естественного света?
12. Расскажите об устройствах для получения плоскополяризованного света. Где применяется поляризованный свет?

Лабораторная работа № 15. Изучение принципов защиты от ионизирующих излучений

Цель работы: ознакомиться с принципами защиты от ионизирующих излучений, научиться измерять естественный радиационный фон бытовым дозиметром.

Приборы и материалы: дозиметр бытовой «Белла».

Радиационная безопасность населения – это состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения. Государство берет на себя обязательства по обеспечению радиационной безопасности населения.

Ионизирующая радиация при воздействии на организм человека может вызвать два вида эффектов, которые клинической медициной относятся к болезням: *детерминированные пороговые эффекты* (лучевая болезнь, лучевой дерматит, лучевая катаракта, лучевое бесплодие, аномалии в развитии плода и др.) и *стохастические* (вероятностные) *беспороговые эффекты* (злокачественные опухоли, лейкозы, наследственные болезни).

Для обеспечения радиационной безопасности при нормальной эксплуатации источников излучения необходимо руководствоваться следующими основными принципами:

- непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (*принцип нормирования*);
- запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением (*принцип обоснования*);
- поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (*принцип оптимизации*).

В отношении всех источников облучения населения следует принимать меры как по снижению дозы облучения у отдельных лиц, так и, в соответствии с принципом оптимизации, по уменьшению числа лиц, подвергающихся облучению.

Таблица 1

Нормируемые величины	Пределы доз	
	Персонал (группа А)	Население
Эффективная доза	20 мЗв/год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв/год	1 мЗв/год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв/год

Примечание: персонал группы А – лица, работающие с техногенными источниками излучения.

Основные пределы доз облучения не включают в себя дозы от природного и медицинского облучения, а также дозы вследствие радиационных аварий. На эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения.

Облучение населения *техногенными источниками излучения* ограничивается путем обеспечения сохранности источников излучения, контроля технологических процессов и ограничения выброса (сброса) радионуклидов в окружающую среду, а также другими мероприятиями на стадии проектирования, эксплуатации и прекращения использования источников излучения.

Ограничение природного облучения. Допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников излучения, для населения не устанавливается. Снижение облучения населения достигается путем установления системы ограничений на облучение населения от отдельных природных источников излучения.

Принципы контроля и ограничения радиационных воздействий в медицине основаны на получении необходимой и полезной диагностической информации или терапевтического эффекта при минимально возможных уровнях облучения. При этом не устанавливаются пределы доз, но используются принципы обоснования назначения радиологических медицинских процедур и оптимизации мер защиты пациентов.

При проведении профилактических медицинских рентгенологических исследований и научных исследований практически здоровых лиц годовая эффективная доза облучения этих лиц не должна превышать 1 мЗв. Установленный норматив годового профилактического облучения может быть превышен лишь в условиях неблагоприятной эпидемиологической обстановки, требующей проведения дополнительных исследований или вынужденного использования методов с большим дозообразованием. Такое решение о временном вынужден-

ном превышении этого норматива профилактического облучения принимается областным, краевым (республиканским) управлением здравоохранения. При использовании источников излучения в медицинских целях контроль доз облучения пациентов является обязательным.

Дозиметрия – от греческого *dosis* – доза, порция + *metro* – измерять – это измерение рассеяния и поглощения энергии ионизирующего излучения в определенном материале. Основное понятие дозиметрии – доза излучения. *Доза излучения* – это величина энергии, поглощенная в единице объема (массы) облучаемого вещества. Различают экспозиционную, поглощенную и эквивалентную дозы.

Экспозиционная доза X определяется через ионизирующую способность рентгеновских и γ -лучей в определенной массе воздуха при энергии рентгеновского или γ -излучения в диапазоне от десятков кэВ до 3 МэВ. Следовательно, *экспозиционная доза* – это заряд, образованный под действием излучения в 1 кг вещества. За единицу экспозиционной дозы в Международной системе единиц (СИ) принят 1 кулон на килограмм (Кл/кг). 1 Кл/кг – это такая экспозиционная доза рентгеновских или γ -лучей, при которой в 1 кг сухого воздуха образуются ионы, несущие заряд в один кулон электричества.

На практике чаще используется внесистемная единица – рентген *R*. Рентген – экспозиционная доза рентгеновских и γ -лучей, при которой в 1 см³ воздуха при нормальных условиях (температура 0 °С и давлении –1013Па) образуется $2,0 \cdot 10^9$ пар ионов. Связь между единицами экспозиционной дозы: $1R = 2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг.

Поглощенная доза (D) – величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу:

$$D = \frac{d\bar{e}}{dm},$$

где $d\bar{e}$ – средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме; dm – масса вещества в этом объеме.

Энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, может быть усреднена по любому определенному объему, и в этом случае средняя доза будет равна полной энергии, переданной объему вещества, деленной на массу этого объема. Единица СИ поглощенной дозы – 1 джоуль на килограмм (Дж/кг) – имеет специальное название – грей (Гр). Используемая ранее внесистемная единица рад равна 0,01 Гр.

Поглощенную дозу по величине экспозиционной дозы определяют расчетным путем по формуле

$$D = X \cdot f,$$

где f – переходный коэффициент, который находят опытным путем. Значения коэффициента f для различных тканей составляют: воздух – 0,88; вода, мягкие ткани – 0,93; костная ткань – от 2 до 5.

Доза эквивалентная ($H_{T,R}$) – это поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения (WR):

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R},$$

где $D_{T,R}$ – средняя поглощенная доза в органе или ткани T , а W_R – взвешивающий коэффициент для какого-либо вида излучения R .

Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы (WR) – это используемые в радиационной защите множители поглощенной дозы, учитывающие относительную эффективность различных видов излучения в индуцировании биологических эффектов:

- Фотоны любых энергий (гамма-излучение)	1
- Электроны (бета-излучение) и мюоны любых энергий	1
- Нейтроны с энергией:	
менее 10 кэВ	5
от 10 кэВ до 100 кэВ	10
от 100 кэВ до 2 МэВ	20
от 2 МэВ до 20 МэВ	10
более 20 МэВ	5
- Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5
- α -частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20

Примечание: все значения относятся к излучению, падающему на тело, а в случае внутреннего облучения – к испускаемому при ядерном превращении. При воздействии различных видов излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения:

$$H_T = \sum_R H_{T,R}.$$

Единицей эквивалентной дозы является *1 зиверт (Зв)*.

Доза эффективная (E) – величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности.

Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты:

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T ,$$

где H_T – эквивалентная доза в органе или ткани T ; а W_T – взвешивающий коэффициент для органа или ткани T . Единица эффективной дозы – 1 зиверт (Зв). Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов при расчете эффективной дозы W_T – это множители эквивалентной дозы в органах и тканях, используемые в радиационной защите для учета различной чувствительности разных органов и тканей в возникновении стохастических эффектов радиации, например: гонады – 0,20; костный мозг (красный) – 0,12.

При необходимости расчета эквивалентной дозы из экспозиционной последнюю последовательно умножают на коэффициенты f и W_R : $H = X f W_R$. Для всех доз вводится понятие о мощности дозы – это доза, получаемая за единицу времени, в системе СИ за 1 секунду (P_X, P_D, P_H).

Защита от ионизирующих излучений

При работе с радиоактивными препаратами необходима защита от внешнего и внутреннего облучения. Для защиты от внутреннего облучения необходимо исключить попадание радиоактивного вещества внутрь человека и животных с пищей, водой или воздухом. Защита от внешнего облучения сводится к уменьшению дозы облучения до величины, близкой к фону. Проанализируем выражение, определяющее экспозиционную дозу точечного источника:

$$X = \frac{K_\gamma \cdot A \cdot t}{R^2} ,$$

где A – активность, мКи; X – доза излучения (рентген); t – время, ч; R – расстояние, см.

Из этого выражения следует, что для уменьшения дозы необходимо: сократить до минимума время работы с радиоактивными веществами (защита временем); максимально увеличить расстояние между человеком и источником излучения (защита расстоянием); уменьшение дозы также достигается экранированием – установкой около источников экранов, поглощающих излучение.

Защита от α -излучения достаточно проста – пробег α -частиц в воздухе составляет 3-1 см, в алюминии 0,08-0,4 мм, для защиты рук от внешнего потока α -частиц достаточно хирургических перчаток.

Защита от β -излучения. Пробег β -частиц в воздухе составляет около 3 м. Одежда и кожа человека поглощают примерно 75% β -частиц, 20-25% частиц проникают внутрь человеческого организма на глубину 2 мм. Наибольшую опасность представляет попадание β -частиц в глаза, так как внешняя поверхность глаза не имеет защитного покрова. При попадании в среду поток β -частиц ослабляется по экспоненциальному закону.

Защита от γ -излучения. Полностью экранировать γ -излучение при разумных толщинах поглотителя нельзя. Интенсивность γ -излучения при прохождении через вещество ослабляется по экспоненциальному закону:

$$P_x = \frac{K_\gamma \cdot A}{R^2} \exp(-\mu d),$$

где P_x – мощность экспозиционной дозы в точке детектирования, $P/ч$; A – активность γ -источника, $мКи$; μ – линейный коэффициент ослабления γ -квантов данной энергии, $см^{-1}$; R – расстояние от источника γ -квантов до места детектирования, $см$; K_γ – гамма-постоянная.

Таблица 2 – Линейный коэффициент ослабления μ , $см^{-1}$ для различных материалов в зависимости от энергии γ -квантов

E_γ , МэВ	Свинец, $см^{-1}$	Алюминий, $см^{-1}$	Бетон, $см^{-1}$	Воздух, $см^{-1}$
0,662	1,18	0,201	0,177	0,0995
1,25	0,658	0,148	0,131	0,0734
1,461	0,590	0,137	0,120	0,0679

Порядок выполнения работы

Задание № 1. Изучение работы бытового дозиметра «Белла».

1. Получите у преподавателя бытовой дозиметр «Белла», ознакомьтесь с инструкцией по работе с прибором (на его тыльной стороне), включите прибор.

2. Пять раз в разных местах учебной аудитории измерьте радиационный фон, запишите показания прибора в таблицу в $мкP/ч$ и в $мкЗв/ч$, найдите средние значения и погрешности результатов измерений.

3. Выйдите на улицу и измерьте радиационный фон вне помещения, результаты представьте в таблице.

Таблица 3

№	Внутри помещений		На открытой местности	
	P_X (мкР/ч)	P_H (мкЗв/ч)	P_X (мкР/ч)	P_H (мкЗв/ч)
1				
5				
P_{cp}				
P_{cp}				

4. Рассчитайте дозу, получаемую человеком за год внутри и вне помещения, сравните с предельно допустимой – 0,02 Зв/год.

5. В таблице 4 приведены значения средней мощности экспозиционной дозы P_X естественного γ -фона в некоторых городах. Используя эти данные, рассчитайте дозу, создаваемую этим фоном за год, сравните со значением в Красноярске.

Таблица 4

Город	P_X , мкР/ч	P_H , Зв/год
Севастополь	5,2	
Хабаровск	11,7	
Новосибирск	13	
Мурманск	16,9	

Задание № 2. Расчет защиты от γ -излучения

1. Рассчитайте толщину защиты от излучения радиоактивного источника Co^{60} .

$$R = \frac{R_0}{\mu}, \text{ где } R_0 = \sqrt{\frac{K_\gamma A t}{X}} \text{ взятого в количестве } A = 1000 \text{ мКи;}$$

мощность дозы за защитой $P_X = 17$ мкР/ч; энергия излучения $E_\gamma = 1,25$ МэВ; гамма-постоянная источника $K_\gamma = 12,85$ Р·см²/(мКи·ч).

Таблица 5

Вещество	μ , см ⁻¹	R, см
Свинец	0,658	
Алюминий	0,148	
Бетон	0,131	
Воздух	$0,0734 \cdot 10^{-3}$	

2. Рассчитайте толщину слоя половинного ослабления ($d_{1/2} = \ln 2 / \mu$) для различных материалов в зависимости от энергии γ -квантов на основе данных таблицы 6.

Таблица 6

E_{γ} , МэВ	Свинец, см ⁻¹	Алюминий, см ⁻¹	Бетон, см ⁻¹	Воздух, см ⁻¹
0,662				
1,25				
1,461				

Контрольные вопросы

1. Что такое радиоактивный распад? Назовите и охарактеризуйте основные виды ионизирующих излучений.
2. Закон радиоактивного распада. Физический смысл постоянной распада и периода полураспада.
3. Что называют активностью радиоактивного препарата? Перечислите известные вам единицы измерения активности.
4. Запишите уравнения реакций для распада ядер по схеме β^+ - и β^- -распада, К-захвата.
5. Какие особенности β^- -распада свидетельствуют об участии нейтрино в этом процессе?
6. Какие естественные радиоактивные изотопы ответственны за постоянное внутреннее облучение человеческого организма?
7. Какой федеральный закон гарантирует обязанность государства обеспечить радиационную безопасность населения России? Какова роль НРБ-99? На какие виды воздействия ионизирующего излучения на человека распространяются нормы?
8. Перечислите, какие дозы используются для измерения излучения, назовите их единицы измерения. Назовите основные пределы доз облучения.
9. Как, зная экспозиционную дозу излучения, рассчитать поглощенную дозу и эквивалентную дозу?
10. Опишите порядок работы с бытовым дозиметром «Белла». Какую информацию можно получить с помощью этого прибора?

ОБЩАЯ ФИЗИКА

Лабораторный практикум

***ЧЖАН Анатолий Владимирович
ЧИЧИКОВА Татьяна Олеговна
ГУРОВА Нина Николаевна***

Электронное издание

Редактор И.Н. Крицына

Подписано в свет 09.06.2021. Регистрационный номер 63
Редакционно-издательский центр Красноярского государственного аграрного университета
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117
e-mail: rio@kgau.ru