

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВИТЕБСКАЯ ОРДЕНА «ЗНАК ПОЧЕТА» ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
АКАДЕМИЯ ВЕТЕРИНАРНОЙ МЕДИЦИНЫ»

**Е. В. Толкач, Н. П. Коваленок, А. Н. Толкач**

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**  
**ПО ДИСЦИПЛИНЕ**  
**«ФИЗИКА С ОСНОВАМИ БИОФИЗИКИ»**

Рабочая тетрадь

для студентов по специальности  
1-74 03 01 «Зоотехния»

---

(Ф.И.О. студента)

\_\_\_\_\_ курс \_\_\_\_\_ группа

Витебск  
ВГАВМ  
2022

УДК 53(07)  
ББК 22.3  
Т52

Рекомендовано к изданию методической комиссией биотехнологического факультета УО «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины» от 22 июня 2022 г. (протокол № 6)

Авторы:

старший преподаватель *Е. В. Толкач*; старший преподаватель *Н. П. Коваленок*; старший преподаватель *А. Н. Толкач*

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук, доцент *М. Н. Борисевич*;  
кандидат ветеринарных наук, доцент *В. В. Петров*

**Толкач, Е. В.**

Т52 Лабораторные работы по дисциплине «Физика с основами биофизики» : рабочая тетрадь для студентов по специальности 1-74 03 01 «Зоотехния» / Е. В. Толкач, Н. П. Коваленок, А. Н. Толкач. – Витебск : ВГАВМ, 2022. – 52 с.

Рабочая тетрадь является вспомогательным изданием к изучению дисциплины «Физика с основами биофизики» для студентов по специальности 1-74 03 01 «Зоотехния».

Рабочая тетрадь содержит теорию, методику выполнения и контрольные вопросы защиты лабораторных работ, справочный материал и список литературы.

**УДК 53(07)**  
**ББК 22.3**

© УО «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины », 2022

**Сводная таблица  
учета выполнения и защиты лабораторных работ**

студента \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_ курса \_\_\_\_\_ факультета

---

(Ф. И. О. студента)

№№ Л/р	Дата выполнения	Оценка за выполнение, оформление и защиту л/р	Зачет по л/р, подпись преподавателя
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

## Содержание

Введение	5
Методы вычисления погрешностей .....	6
Л/р №1. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса .....	8
Л/р №2. Определение коэффициента диэлектрической поляризации питательных веществ .....	12
Л/р №3. Определение удельной электропроводности растворов электролитов .....	17
Л/р №4. Изучение дисперсии электропроводности ткани переменному току .....	22
Л/р №5. Определение фокусных расстояний и оптической силы линз .....	27
Л/р №6. Определение концентрации раствора сахарозы с помощью рефрактометра .....	32
Л/р №7. Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки .....	38
Л/р №8. Изучение основных законов внешнего фотоэффекта .....	43
Приложение .....	49
Литература .....	51

## Введение

Выполнение лабораторных работ имеет важное значение в обучении студентов физическим методам получения и анализа результатов измерений. В ходе выполнения лабораторных работ студенты должны получить более глубокое понимание физического смысла измеренных величин; овладеть основными принципами и методами измерений, методами обработки и представления результатов измерений; научиться анализировать полученные результаты и сопоставлять данные эксперимента с теорией, делать выводы.

Данное пособие является практическим руководством по выполнению лабораторных работ и предназначено для студентов по специальности 1-74 03 01 «Зоотехния».

Каждая лабораторная работа содержит краткий теоретический материал, который студент должен изучить до ее выполнения, обоснование выполняемого опыта и методику проведения эксперимента, а также контрольные вопросы, которые используются для самоконтроля и при защите лабораторных работ.

Порядок выполнения лабораторных работ не совпадает с их нумерацией в данном лабораторном практикуме. Каждую работу студенты выполняют подгруппой из нескольких человек по специальному графику, составленному преподавателем. Студенты готовятся к выполнению лабораторных работ в часы самостоятельных занятий. Обработка результатов измерений и отчет по выполненной работе проводится во время лабораторных занятий.

## Методы вычисления погрешностей

Всякое измерение определяемой величины сопровождается той или иной ошибкой, или погрешностью. Поэтому недостаточно знать только результат измерения, необходимо еще определить величину допущенной погрешности. Погрешности делятся на *систематические* и *случайные*.

*Систематические* ошибки возникают из-за неисправности или несовершенства измерительных приборов. Например, из-за смещения нуля измерительных приборов (амперметра, вольтметра и др.) все отсчеты будут искажены. Такие недостатки приборов изменяют результат измерений всегда в одну сторону, либо увеличивая, либо уменьшая его.

Систематические ошибки могут быть допущены также в процессе работы, если теория опыта недостаточно разработана и не учтены все причины, влияющие на точность измерений. Например, при определении сопротивления проводников, растворов не учтена поправка на температуру и т.д.

Систематические ошибки могут быть уменьшены при более тщательном изучении приборов и устранении их недостатков, при более подробной разработке теории опыта и введении поправочных коэффициентов в результат измерений. Характерно, что увеличение числа измерений не уменьшит систематических ошибок.

*Случайные* ошибки вызываются неточностью отсчета, которую невольно допускает каждый экспериментатор. Например, недостаток органов зрения, органов слуха, реакции включения и выключения приборов отсчета времени и т.д.

В отличие от систематических случайные ошибки могут изменять результат измерений в обе стороны, т.е. увеличивать или уменьшать его. Поэтому для уменьшения влияния случайных ошибок необходимо всякое измерение проводить несколько раз  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ .

Случайные ошибки подчиняются законам вероятности. Это значит, что если при каком-либо измерении получится результат больше истинного, то при следующих измерениях столь же вероятно может получиться результат меньше истинного. Очевидно, многократные повторения одного и того же измерения уменьшат влияние случайных ошибок, так как нет основания считать отклонение от истинного значения в одну сторону более вероятным, чем в другую, и среднее арифметическое из большого числа измерений будет ближе к истинному значению, чем отдельные измерения.

### Математический аппарат вычисления случайных ошибок прямых измерений

1. При измерении какой-либо величины получают ряд значений:  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ .

2. Вычисляют среднее арифметическое значение измеряемой величины:

$$x_{cp.} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

3. Вычисляют отклонения отдельного измерения от среднего арифметического значения, т.е. абсолютную ошибку:

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= \left| x_{cp.} - x_1 \right|; \\ \Delta x_2 &= \left| x_{cp.} - x_2 \right|; \\ \Delta x_n &= \left| x_{cp.} - x_n \right|\end{aligned}\quad (2)$$

4. Вычисляют среднее арифметическое численных значений отдельных абсолютных ошибок, т.е. *среднюю абсолютную ошибку* всех измерений:

$$\Delta x_{cp.} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \dots + \Delta x_n}{n} \quad (3)$$

5. Тогда результат измерения:

$$x = x_{cp.} \pm \Delta x_{cp.} \quad (4)$$

6. Отношение средней абсолютной ошибки всех измерений  $\Delta x_{cp.}$  к среднему арифметическому значению  $x_{cp.}$  измеряемых величин называется *средней относительной ошибкой*:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x_{cp.}}{x_{cp.}} \cdot 100\% \quad (5)$$

**Пример:** Пусть при  $n = 3$  измерений сопротивления проволоки с помощью прибора ЕС-11 получены следующие числовые значения:

$$R_1 = 5,0 \text{ Ом}; \quad R_2 = 4,9 \text{ Ом}; \quad R_3 = 5,1 \text{ Ом}.$$

1. Найдем среднее арифметическое значение величины:

$$R_{cp.} = \frac{5,0 + 4,9 + 5,1}{3} = 5,0 \text{ (Ом)}$$

2. Вычислим абсолютную ошибку измерения:

$$\Delta R_1 = |5,0 - 5,0| = 0 \text{ (Ом)}; \quad \Delta R_2 = |5,0 - 4,9| = 0,1 \text{ (Ом)}; \quad \Delta R_3 = |5,0 - 5,1| = 0,1 \text{ (Ом)}$$

3. Вычислим среднюю абсолютную ошибку:

$$\Delta R_{cp.} = \frac{0 + 0,1 + 0,1}{3} = 0,07 \text{ (Ом)}$$

4. Запишем результат измерения:  $R = (5,0 \pm 0,07) \text{ Ом}$ .

5. Определим относительную ошибку измерения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_{cp.}}{R_{cp.}} \cdot 100\% = \frac{0,07}{5,0} \cdot 100\% = 1,4\%$$

# Лабораторная работа № 1

## Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

**Цель работы:** изучение метода Стокса, экспериментальное определение коэффициента вязкости жидкости.

**Приборы и принадлежности:** цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью, шарики, микрометр, секундомер.

### Теория опыта

**Реальная жидкость** – сжимаемая жидкость, обладающая вязкостью.

**Сжимаемость** – свойство жидкости изменять свой объем под действием давления.

**Вязкостью, или внутренним трением**, называется явление возникновения силы трения между слоями текущей жидкости, параллельными направлению течения.

Вязкость проявляется как сила сопротивления при помешивании жидкости, вызывает замедление скорости падения тел внутри жидкости.

В результате наличия сил трения при течении жидкость начинает делиться на слои, движущиеся параллельно друг другу с различными скоростями. При этом каждый слой получает ускорение со стороны верхнего слоя и тормозится нижним слоем.

Распределение скорости текущей жидкости определяется **градиентом скорости** – это векторная величина, направленная перпендикулярно скорости и показывающая, как изменяется скорость на некотором расстоянии, то есть при переходе от слоя к слою и определяемая по формуле:

$$\text{grad}\vec{v} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta x}, \quad (1)$$

где  $\Delta\vec{v}$  – изменение скорости при переходе от одного слоя к другому;  
 $\Delta x$  – расстояние между слоями жидкости.

Ньютон доказал, что сила внутреннего трения, возникающая между двумя параллельными слоями жидкости, прямо пропорциональна градиенту скорости и площади соприкасающихся слоев жидкости.

**Формула Ньютона:**

$$\vec{F}_{mp.} = -\eta \cdot \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta x} \cdot S = \eta \cdot \text{grad}\vec{v} \cdot S, \quad (2)$$

где  $\eta$  (греч. «этта») – коэффициент вязкости жидкости;

$S$  – площадь соприкасающихся слоев жидкости.

Знак «минус» указывает на то, что сила внутреннего трения направлена противоположно градиенту скорости.

Выразим из формулы (2) **коэффициент вязкости:**

$$\eta = \frac{F_{mp.}}{\frac{\Delta v}{\Delta x} \cdot S} \quad (3)$$



**Коэффициент вязкости** численно равен силе трения, возникающей между слоями жидкости единичной площади, при градиенте скорости, равном единице.

В системе СИ единица измерения коэффициента вязкости – **Па·с** (Паскаль в секунду).

У большинства жидкостей коэффициент вязкости зависит от природы жидкости, температуры, давления. Такие жидкости называются **ньютоновскими**.

У некоторых жидкостей, преимущественно у высокомолекулярных соединений или представляющих дисперсные системы (суспензии, эмульсии), коэффициент вязкости зависит от режима течения жидкости – давления и градиента скорости. Такие жидкости называются **неньютоновскими**. Их вязкость характеризуется условным коэффициентом жидкости, который относится к определенным условиям течения жидкости.

Одним из наиболее простых методов определения коэффициента динамической вязкости является метод Стокса, основанный на изучении движения тел сферической формы в вязкой среде. Благодаря вязкости тело, движущееся в жидкости, увлекает прилегающие к нему слои жидкости и поэтому испытывает сопротивление (трение) со стороны жидкости.

Суть метода заключается в следующем: если в сосуд с жидкостью бросить шарик с плотностью большей, чем плотность жидкости, то он будет падать. На движущийся шарик действуют три силы (рисунок 1):

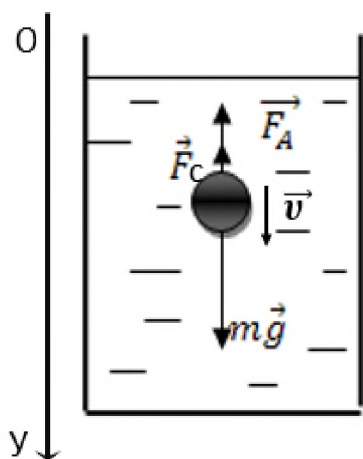


Рисунок 1 –  
Метод Стокса

1. **Сила тяжести**, направленная вертикально вниз:

1. **Сила тяжести**, направленная вертикально вниз:

$$F_T = m_T \cdot g = \rho_T \cdot V \cdot g,$$

где  $\rho_T$  – плотность тела;

$V$  – объем;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

2. **Сила Архимеда** – выталкивающая сила, направленная вертикально вверх:

$$F_A = \rho_{жс} \cdot V \cdot g,$$

где  $\rho_{жс}$  – плотность жидкости.

3. **Сила внутреннего трения (сила сопротивления)**, тормозящая движение тела и направленная противоположно движению шарика.

Стокс эмпирически установил, что сила сопротивления, действующая на тело сферической формы, при движении его с небольшой скоростью в вязкой жидкости определяется по формуле (**закон Стокса**):

$$F_C = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v, \quad (4)$$

где  $\eta$  – коэффициент внутреннего трения жидкости;

$r$  – радиус тела;

$v$  – скорость движения тела в жидкости.

Таким образом, коэффициент вязкости жидкости по методу Стокса можно определить формулой:

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{d^2 \cdot g \cdot t \cdot (\rho_T - \rho_{жс})}{L}, \quad (5)$$

где  $d$  – диаметр шара;

$t$  – время;

$L$  – расстояние, пройденное телом.

### Порядок выполнения задания

Измерительная установка представляет собой цилиндрический сосуд с налитой в него исследуемой жидкостью (рисунок 2). Для измерения коэффициента вязкости при различных температурах в него помещен нагревательный элемент Н, подключенный к источнику переменного тока. Измерение температуры жидкости производится с помощью термометра Т.

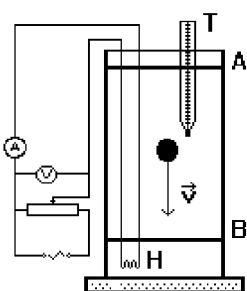


Рисунок 2 – Схема опыта

1. Измерьте термометром температуру жидкости. По таблице 1 определите плотность жидкости при данной температуре.

Таблица 1 - Зависимость плотности жидкости от температуры

$T, ^\circ C$	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$\rho_{жс} \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3$	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91

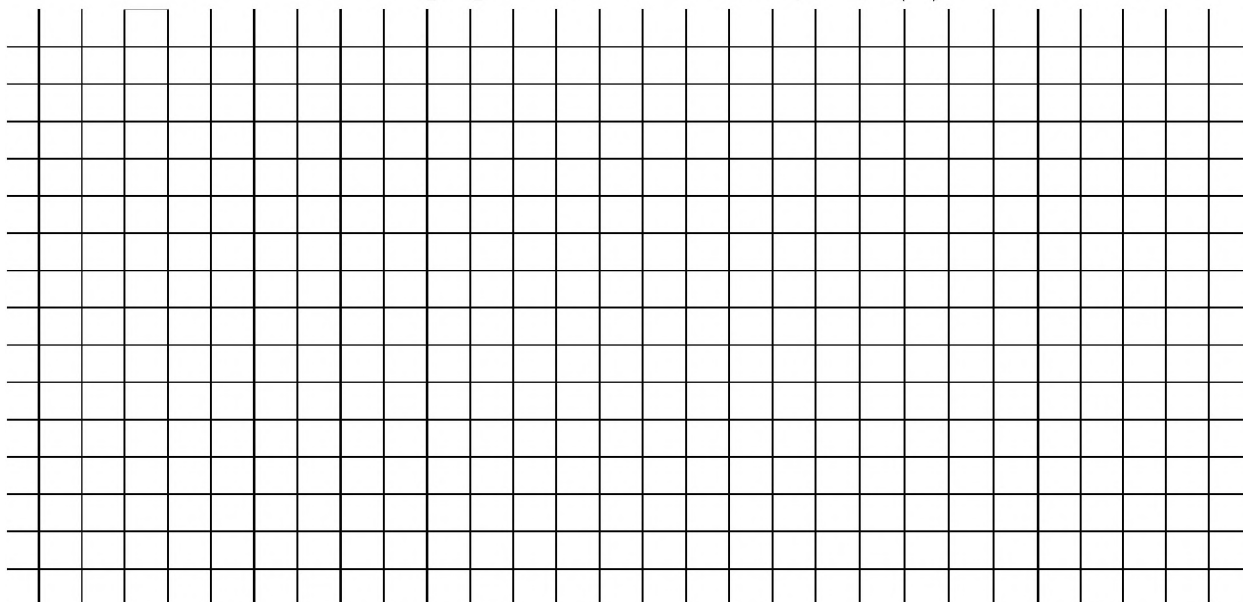
2. С помощью микрометра определите диаметр шарика  $d$ .
3. Измерьте расстояние  $L$ , которое будет проходить шарик, между метками А и В на сосуде.
4. Опустите шарик через отверстие в крышке цилиндрического сосуда в исследуемую жидкость и с помощью секундомера измерьте время  $t$  прохождения шариком расстояния  $L$ .
5. Включите нагревательный элемент и проведите аналогичные измерения при еще двух значениях температуры.
6. По формуле (5) рассчитайте коэффициент вязкости жидкости  $\eta$  при разных температурах.
7. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 2.

Таблица 2 - Результаты измерений и вычислений

№	$L, \text{ м}$	$T, ^\circ C$	$d, \text{ м}$	$\rho_T, \text{ кг/м}^3$	$\rho_{жс} \cdot 10^3, \text{ кг/м}^3$	$t, \text{ с}$	$\eta, \text{ Па}\cdot\text{с}$
1							
2							
3							

8. Постройте график зависимости коэффициента вязкости от температуры  $\eta = f(T)$ .
9. Сделать вывод о зависимости коэффициента вязкости от температуры.

**График зависимости  $\eta = f(T)$**



**Вывод:**

**Контрольные вопросы защиты лабораторной работы № 1**

1. Что такое реальная жидкость?
2. Что такое вязкость?
3. Дать определение сжимаемости жидкости.
4. Дать определение и записать формулу градиента скорости.
5. Запишите формулу и дайте определение силы внутреннего трения (формула Ньютона).
6. Запишите формулу и дайте определение коэффициента вязкости жидкости.
7. От чего зависит коэффициент вязкости жидкости?
8. Описать сущность метода Стокса.
9. Изобразить и назвать силы, действующие на тело сферической формы, движущиеся в жидкости.
10. Запишите формулу для расчета коэффициента вязкости жидкости по методу Стокса.

## Лабораторная работа №2

### Изучение диэлектрической поляризации питательных веществ

**Цель работы:** ознакомиться с видами поляризации диэлектриков, научиться измерять ЭДС поляризации питательных веществ и сделать вывод об изменении ЭДС поляризации с течением времени, научиться определять коэффициент поляризации питательных веществ.

**Приборы и принадлежности:** источник постоянного тока, цифровой мультиметр, ключ, секундомер, исследуемое вещество.

#### Теория опыта

**Диэлектриками** называются вещества, которые не имеют свободных электрических зарядов и не проводят электрический ток.

По своим электрическим свойствам молекулы диэлектрика подобны электрическим диполям.

**Диполь** – это система, состоящая из двух одинаковых по величине, но противоположных по знаку зарядов, расположенных на расстоянии  $L$  друг от друга (рисунок 1).

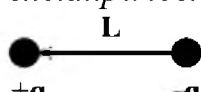


Рисунок 1 –  
Диполь

По своим электрическим свойствам молекулы диэлектрика подобны электрическим диполям.

**Диполь** – это система, состоящая из двух одинаковых по величине, но противоположных по знаку зарядов, расположенных на расстоянии  $L$  друг от друга (рисунок 1).

Основной характеристикой диполя является **дипольный момент**  $P_L$  – вектор, равный произведению заряда на плечо диполя  $L$  и направленный от отрицательного заряда к положительному:

$$P_L = q \cdot L, \quad (1)$$

где  $q$  – суммарная величина положительных (или равных им отрицательных) зарядов молекулы;

$L$  – расстояние между центрами тяжести положительных и отрицательных зарядов.

В зависимости от строения молекул различают *три группы диэлектриков*:

**1. Неполлярные диэлектрики**, молекулы которых имеют симметричное строение, то есть «центр тяжести» положительного ядра совпадает с «центром тяжести» отрицательного заряда электронной оболочки. К ним относятся водород, кислород, азот, углеводы и т.д.

**2. Полярные диэлектрики**, молекулы которых имеют несимметричное строение, то есть «центры масс» их положительных и отрицательных зарядов не совпадают, и они представляют собой диполи. К ним относятся вода, нитробензол, спирты, щелочи, кислоты, белки, биополимеры и др.

**3. Кристаллические диэлектрики**, молекулы которых имеют ионное строение. Кристаллические решетки ионных диэлектриков можно рассматривать как состоящие из двух подрешеток, каждая из которых образована ионами одного знака, вставленных одна в другую. При отсутствии внешнего электрического поля подрешетки расположены симметрично. Примером является каменная соль, кварц, слюда, корунд и др.

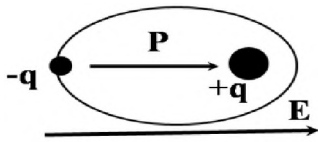
При помещении диэлектрика в электрическое поле происходит поляризация.

**Поляризация** – возникновение в диэлектрике собственного электрического поля при внесении его во внешнее электрическое поле, обусловленное смещением связанных заряженных частиц, входящих в состав атомов или молекул диэлектрика.

Диэлектрик, в котором возникло такое поле, называют **поляризованным**.

Различают *три вида поляризации диэлектриков*:

**1. Электронная поляризация** возникает у диэлектриков с неполярными



молекулами. При помещении такого диэлектрика во внешнее электрическое поле положительный заряд каждой молекулы смещается в направлении поля, а электронная оболочка вытягивается в противоположную сторону. Молекула становится полярной, т.е. подобной электрическому диполью, и в результате этого диэлектрик поляризуется (рисунок 2).

Рисунок 2 – Электронная поляризация

**2. Ориентационная, или дипольная, поляризация**

возникает у диэлектриков с полярными молекулами. Под влиянием внешнего электрического поля все дипольные молекулы диэлектрика поворачиваются так, что их оси располагаются вдоль силовых линий внешнего электрического поля  $E$ , в результате диэлектрик поляризуется (рисунок 3).

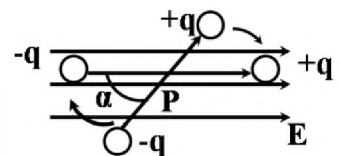


Рисунок 3 – Дипольная поляризация

**3. Ионная поляризация** возникает в кристаллических диэлектриках, имеющих ионные кристаллические решетки. Во внешнем поле происходит смещение ионов подрешеток в противоположных направлениях: положительных ионов решетки по направлению поля, а отрицательных ионов – в противоположную сторону.

Рассмотрим диэлектрик, находящийся во внешнем электрическом поле напряженностью  $E_0$ . Поляризация диэлектриков приводит к уменьшению этого поля внутри диэлектрика, т.к., поляризуясь, диэлектрик создает собственное электрическое поле напряженностью  $E_{св.}$ , направленное против внешнего поля.

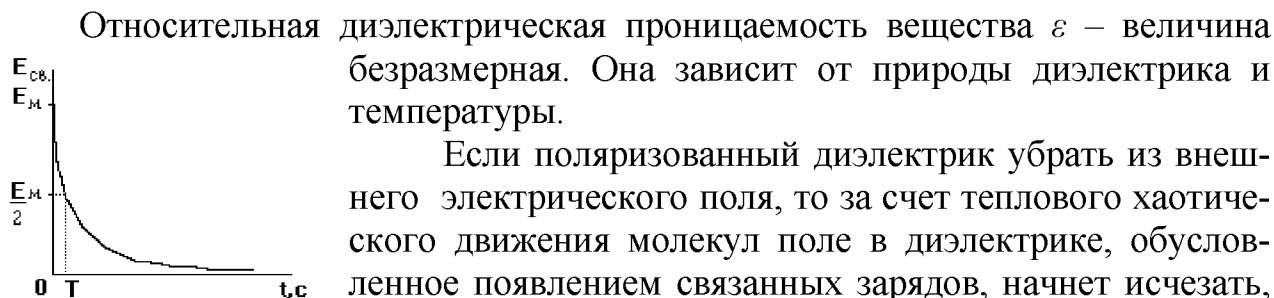
В результате в диэлектрике будет возникать электрическое поле, напряженность которого равна:

$$E = E_0 - E_{св.}$$

Степень уменьшения напряженности электрического поля в диэлектрике  $E$  по сравнению с напряженностью электрического поля в вакууме  $E_0$  характеризуется **относительной диэлектрической проницаемостью вещества**.

**Относительной диэлектрической проницаемостью вещества  $\epsilon$**  называется величина, которая показывает, во сколько раз напряженность электрического поля в вакууме больше, чем напряженность электрического поля в диэлектрике:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E} = \frac{E_0}{E_0 - E_{св.}} \quad (2)$$



**Рисунок 4 - Изменение напряженности в диэлектрике**

Относительная диэлектрическая проницаемость вещества  $\varepsilon$  – величина безразмерная. Она зависит от природы диэлектрика и температуры.

Если поляризованный диэлектрик убрать из внешнего электрического поля, то за счет теплового хаотического движения молекул поле в диэлектрике, обусловленное появлением связанных зарядов, начнет исчезать, а его напряженность  $E_{св.}$  будет с течением времени уменьшаться по экспоненциальному закону (рисунок 4):

$$E_t = E_0 \cdot e^{-k \cdot t}, \quad (3)$$

где  $E_t$  – напряженность электрического поля связанных зарядов в данный момент времени  $t$ ;

$E_0$  – напряженность электрического поля связанных зарядов в момент отключения внешнего поля ( $t=0$ );

$e$  – основание натуральных логарифмов ( $e \approx 2,71$ );

$k$  – коэффициент диэлектрической поляризации;

$t$  – время.

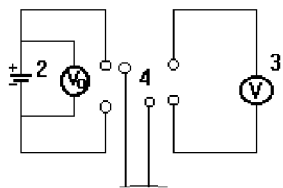
**Коэффициент диэлектрической поляризации** будет определяться формулой:

$$k = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{T}, \quad (4)$$

где  $T=t$  – это время, за которое напряженность электрического поля в диэлектрике уменьшится в два раза.

Большинство продуктов питания и питательных веществ (овощи, фрукты и др.) по своим физическим свойствам близки к диэлектрикам.

### Порядок выполнения работы



**Рисунок 5 – Схема опыта**

1. Собрать электрическую схему (рисунок 5), состоящую из исследуемого питательного вещества и иглы – 1; источника постоянного тока – 2; цифрового мультиметра – 3; четырехполюсного ключа – 4.

2. В питательное вещество вставить иглы на глубину 0,01 м с расстоянием между ними 0,01 м и ключом замкнуть на источник постоянного тока на 20-30 секунд.

Переключить ключ на мультиметр и быстро записывать его показания в таблицу через 0, 10, 20, ... и т. д. секунд до момента времени, когда напряженность уменьшится в два раза.

3. Вычислить по формуле (2) значение относительной диэлектрической проницаемости. Значение напряженности внешнего электрического поля  $E_0$  измеряем с помощью вольтметра на источнике тока;  $E_{св.}$  – значение напряженности электрического поля внутри диэлектрика в момент времени  $t=0$ .

4. По формуле (4) вычислить коэффициент диэлектрической поляризации  $k$ .

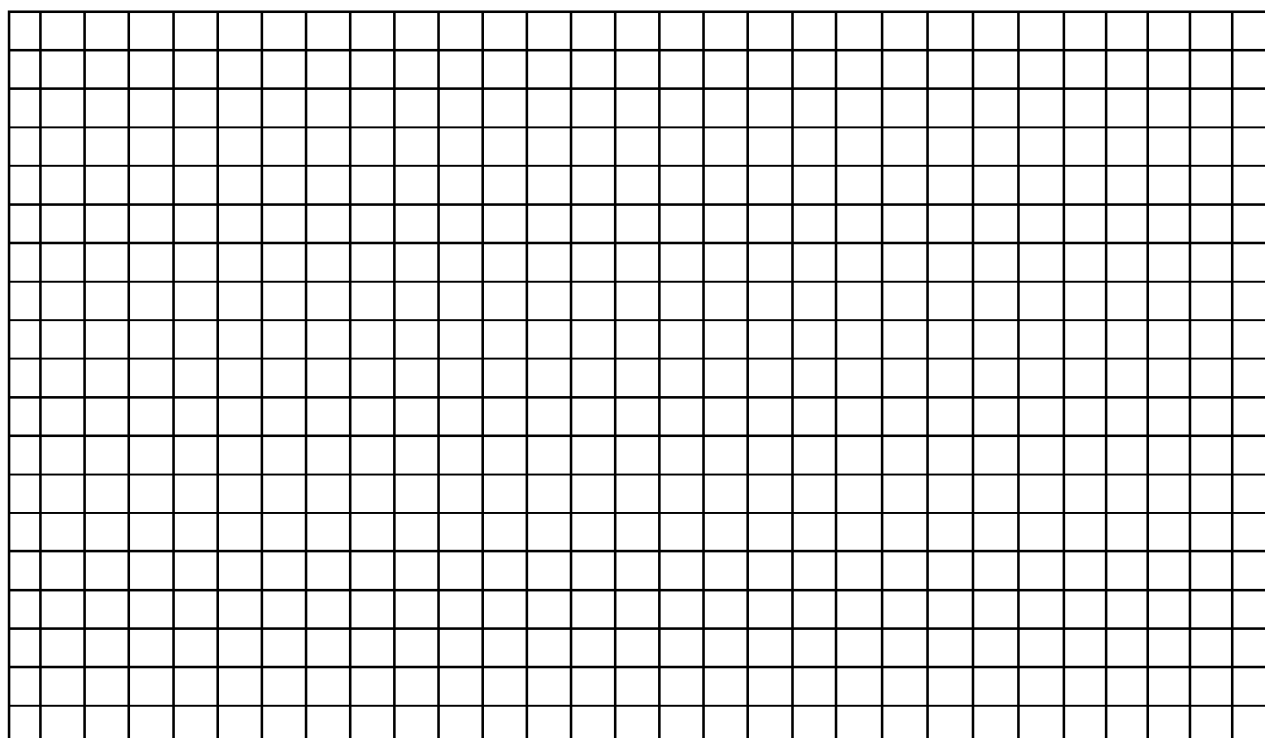
**Таблица 1 - Результаты измерений и вычислений**

$t,$ $c$	$E \cdot 10^{-2},$ $B/m$	$t,$ $c$	$E \cdot 10^{-2},$ $B/m$	$t,$ $c$	$E \cdot 10^{-2},$ $B/m$
0		0		0	
10		10		10	
20		20		20	
30		30		30	
40		40		40	
50		50		50	
60		60		60	
70		70		70	
80		80		80	
90		90		90	
100		100		100	
110		110		110	
120		120		120	
130		130		130	
140		140		140	
150		150		150	
$\varepsilon =$		$\varepsilon =$		$\varepsilon =$	
$k =$		$k =$		$k =$	

5. Построить график зависимости изменения напряженности электрического поля от времени  $E=f(t)$ .

6. Сделать вывод о зависимости напряженности электрического поля в диэлектрике от времени.

**График зависимости  $E = f(t)$**



**Вывод:**

## **Вычисления к лабораторной работе № 2**

### **Контрольные вопросы защиты лабораторной работы № 2**

1. Какие вещества называются диэлектриками? Приведите пример.
2. Что такое диполь?
3. Дать определение и записать формулу дипольного момента.
4. Назовите и дайте характеристику видам диэлектриков.
5. Что называется поляризацией диэлектрика?
6. Какие виды поляризации диэлектриков вы знаете?
7. Какой диэлектрик называется поляризованным?
8. Что показывает относительная диэлектрическая проницаемость вещества?
9. В чем причина уменьшения электрического поля связанных зарядов после выключения внешнего электрического поля?
10. Запишите формулу для определения коэффициента поляризации.



### Лабораторная работа № 3 Определение удельной электропроводности растворов электролитов

**Цель работы:** Ознакомиться с принципом работы схемы моста Уитстона, научиться вычислять сопротивление электролитов и их электропроводность.

**Приборы и принадлежности:** сосуд с электродами для электролитов, звуковой генератор, термометр, сосуды с растворами  $KCl$  ( $0,1N$  и  $0,05N$ ), провода, осциллограф, реохорд.

#### Теория опыта

**Электролитами** называют *растворы солей, кислот и оснований*.

Основными носителями зарядов в электролитах являются *положительно и отрицательно заряженные ионы (катионы и анионы)*, которые образуются в растворе в результате электролитической диссоциации нейтральных молекул растворенного вещества.

По способности к электролитической диссоциации условно выделяют сильные и слабые электролиты. *Сильные электролиты* образуются при использовании веществ, которые при растворении практически полностью диссоциируют на ионы независимо от их концентрации в растворе, а *слабые электролиты* получают, когда при растворении происходит лишь частичная (обратимая) диссоциация вещества на ионы.

Если к электролиту приложить электрическое поле, то в нем появляется упорядоченное движение ионов к противоположно заряженным электродам. Возникает *электрический ток*, который обеспечивается переносом зарядов *катионами и анионами*. Раствор обладает ионной проводимостью. Скорость ионов  $v$  в растворе пропорциональна напряженности электрического поля  $E$ .

**Подвижность иона** – это скорость передвижения иона в растворителе при наличии электрического поля с напряженностью  $1$  вольт на метр.

Подвижность иона характеризует его способность преодолевать сопротивление среды при его направленном движении в электрическом поле. Подвижность иона пропорциональна скорости его движения и зависит от природы иона, а также от температуры и концентрации раствора.

Плотность тока  $i$ , переносимого катионами  $i_+$  и анионами  $i_-$ , пропорциональна их заряду  $z$ , концентрации ионов и скорости их направленного движения:

$$i = \bar{e} \cdot Z \cdot n \cdot (b^+ + b^-) \cdot E \quad \text{или} \quad i = \gamma \cdot E, \quad (1)$$

где  $n$  – концентрация - число молекул в единице объема;

$Z$  – валентность ионов;

$b^+$  и  $b^-$  – подвижность положительных и отрицательных ионов;

Величина  $\gamma$  называется **удельной электропроводностью** и определяется по формуле:

$$\gamma = \bar{e} \cdot Z \cdot n \cdot (b^+ + b^-) \quad (2)$$

Удельная электропроводность характеризует способность раствора проводить электрический ток.

Из формулы (2) видно, что удельная электропроводность зависит от концентрации раствора и подвижности ионов электролита. При повышении температуры увеличивается скорость движения ионов, поэтому возрастает удельная электропроводность.

*Удельная электропроводность ( $\gamma$ ) - это величина, обратная удельному сопротивлению среды*

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

Единица измерения удельной электропроводности:

$$[\gamma] = \left[ \frac{1}{\rho} \right] = \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}} = \frac{\text{См}}{\text{м}}.$$

Для измерения электропроводности растворов методы, пригодные для металлических проводников, не годятся. Дело в том, что все эти методы связаны с пропусканием через проводник постоянного тока. Но при пропускании постоянного тока через раствор будут проходить следующие процессы. На первой стадии катионы направляются к катоду, а анионы – к аноду, т. е. начнется пространственное разделение зарядов. Возле каждого электрода скапливаются ионы противоположных знаков, которые создают свое электрическое поле, направленное противоположно внешнему полю, т.е. появится ЭДС поляризации и свойства раствора изменятся. При этом сила тока на участке цепи, содержащем электролит, будет определяться по закону Ома:

$$I = \frac{U - \varepsilon_{\text{пол}}}{R}, \quad (4)$$

где  $I$  – сила тока;

$U$  – напряжение между электродами;

$R$  – сопротивление;

$\varepsilon_{\text{пол}}$  – ЭДС поляризации, которая направлена против разности потенциалов, создаваемой между электродами внешним источником тока.

Если постоянный ток пропускать дальше, то ионы достигнут поверхности электрода и там пойдут окислительно-восстановительные реакции, называемые *электролизом*. На катоде восстанавливается металл, в результате чего он покрывается металлической пленкой. На аноде будут выделяться газы.

*Электролиз – это процесс выделения чистого вещества на электродах при прохождении постоянного электрического тока через электролит.*

Свойства раствора изменятся уже необратимо. Поэтому для измерения электропроводности растворов применяют переменный ток звуковой частоты. Основная идея применения переменного тока заключается в том, что в этом случае времени на формирование новой фазы окажется недостаточно, состав раствора не изменится и электролиза не будет.

Удельную электропроводность растворов электролитов можно определить по схеме моста Уитстона с применением источника переменного тока (рисунок 1), где З.Г. – звуковой генератор (источник переменного тока); О – осциллограф;

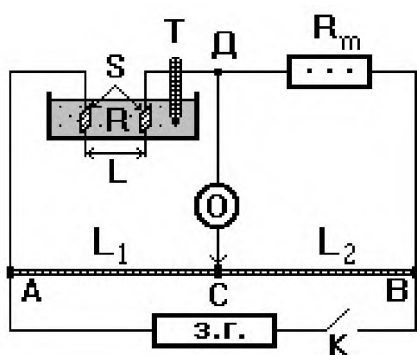


Рисунок 1 – Мост Уитстона

К – ключ;  $R$  – сосуд с электролитом;  $R_m$  – магазин сопротивлений; АВ – реохорд с передвижным контактом С.

Реохорд представляет собой линейку длиной 1 м, на которую натянута проволока, по поверхности которой может перемещаться (скользить) ползунок. Подвижный контакт С делит проволоку на две части. Передвигая ползунок по реохорду, можно изменять сопротивления. При произвольных значениях сопротивлений через осциллограф  $O$  будет течь ток того или

иного направления. Однако сопротивления можно подобрать таким образом, что ток через осциллограф проходить не будет ( $I_{CD}=0$ ). В этом случае потенциалы точек С и Д равны ( $\varphi_C = \varphi_D$ ). Такое состояние называют равновесием моста.

Тогда сопротивление можно рассчитать по формуле:

$$R = R_m \cdot \frac{L_1}{L_2}, \quad (5)$$

где  $R_m$  – известное сопротивление (сопротивление магазина);

$R$  – определяемое неизвестное сопротивление объема электролита сечением  $S$  и длиной  $L$ ;

$L_1$  и  $L_2$  – соответственно длина левого и правого плеча реохорда.

Сопротивление раствора электролита можно определить, как и сопротивление проводника по формуле:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}, \quad (6)$$

где  $L$  – расстояние между электродами;

$S$  – площадь электродов;

$\rho$  – удельное сопротивление электролита.

Выразив из уравнения (6) удельное сопротивление  $\rho$ , получим:  $\rho = \frac{R \cdot S}{L}$ .

Подставив его в выражение (3), получим:

$$\gamma = \frac{L}{S} \cdot \frac{1}{R} \quad (7)$$

Для определения удельной электропроводности используется специальный сосуд с жестко закрепленными электродами. Если заполнять сосуд растворами всегда до одного и того же уровня, то отношение  $\frac{L}{S} = C$  будет постоянным. Величина  $C$  называется *электролитической емкостью сосуда* (константой сосуда). Тогда выражение (6) для удельной электропроводности примет вид:

$$\gamma = \frac{C}{R} \quad (8)$$

Экспериментальный метод определения удельной электропроводности сводится к измерению сопротивления стандартного раствора  $R_0$  и расчета константы сосуда  $C$ , когда сосуд заполнен стандартным раствором с известной удельной электропроводностью:

$$C = \gamma_0 \cdot R_0 \quad (9)$$

После этого измеряют сопротивление исследуемого электролита  $R$  и по формуле (7) определяют его удельную электропроводность  $\gamma$ .

### Порядок выполнения работы

1. В сосуд налить до метки стандартный раствор  $KCl$  с известной электропроводностью  $\gamma_0$ .

2. В соответствии с температурой раствора по таблице найти электропроводность стандартного раствора.

3.

Таблица 1 - Зависимость электропроводности стандартного раствора от температуры

$t, ^\circ C$	15	16	17	18	19	20	21	25
$\gamma_0, \text{См/м}$	1,048	1,072	1,095	1,119	1,143	1,167	1,191	1,191

4. Вставить электроды в сосуд с электролитом. Замкнуть ключ  $K$ .

5. Уравновесить мост Уитстона, для чего:

а) установить передвигной контакт  $C$  реохорда так, чтобы длины плеч реохорда были одинаковы:  $L_1 = L_2$ ;

б) изменяя сопротивление магазина  $R_m$ , приблизительно добиться наименьшего сигнала на осциллографе;

в) при найденном сопротивлении магазина  $R_m$ , перемещая передвигной контакт  $C$  реохорда, добиться самого наименьшего сигнала на осциллографе, что соответствует точному уравновешиванию моста Уитстона, при котором сила тока на участке  $CD$ , где находится осциллограф, равна нулю:  $I_{CD}=0$ .

6. Сбалансировав мост, определить по реохорду длины плеч  $L_1$  и  $L_2$ .

7. Измерения повторить еще два раза при других значениях сопротивления магазина.

8. По формуле (5) найти сопротивление электролита, его среднее значение и по формуле (9) найти значение постоянной сосуда  $C$ .

9. Аналогичные измерения произвести с исследуемым раствором электролита. Рассчитать сопротивление исследуемого раствора  $R$  по формуле (5), найти его среднее значение.

10. Зная постоянную сосуда  $C$ , определенную по стандартному раствору, по формуле (8) найти удельную электропроводность  $\gamma$  исследуемого раствора.

11. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

**Таблица 2 - Результаты измерений и вычислений**

№ опыта	Стандартный раствор						$C, \frac{1}{M}$	Исследуемый раствор					
	$\gamma, \frac{C_M}{M}$	$R_m, \text{Ом}$	$L_1, \text{м}$	$L_2, \text{м}$	$R_0, \text{Ом}$	$R_{0cp}, \text{Ом}$		$R_m, \text{Ом}$	$L_1, \text{м}$	$L_2, \text{м}$	$R_0, \text{Ом}$	$R_{0cp}, \text{Ом}$	$\gamma, \frac{C_M}{M}$
1													
2													
3													

**Контрольные вопросы защиты лабораторной работы № 3**

1. Что представляет собой электролит?
2. Что представляет собой электрический ток в электролитах?
3. В чем отличие сильных и слабых электролитов?
4. Дайте определение подвижности иона. Какие факторы влияют на подвижность ионов в электролите?
5. Запишите закон Ома для участка цепи, содержащего электролит.
6. Что называется электролизом?
7. Дайте определение удельной электропроводности.
8. Как в общем случае влияет концентрация ионов в электролите на его электропроводность?
9. Какая схема лежит в основе определения удельной электропроводности раствора электролита в данной работе?
10. Запишите формулы, по которым рассчитываются сопротивление электролита, электролитическая емкость сосуда, удельная электропроводность электролита.

## Лабораторная работа № 4

### Изучение дисперсии электропроводности ткани переменному току

**Цель работы:** научиться определять импеданс ткани живого организма и изучить зависимость импеданса от частоты переменного тока, познакомиться с методом диагностики – реографией.

**Приборы и принадлежности:** микроамперметр для переменного тока, вольтметр переменного тока, два свинцовых электрода, генератор электрических колебаний, потенциометр, ключ, провода.

#### Теория опыта

**Переменным** называется ток, который изменяется по величине и направлению с течением времени.

При пропускании электрического тока живую ткань можно представить как электрическую цепь, состоящую из определенных элементов. Содержимое клетки и внеклеточная среда являются проводниками с ионной проводимостью. Они обладают активным сопротивлением клетки  $R$ . Клеточная мембрана представляет собой диэлектрик. Содержимое клетки и внеклеточная среда, разделенные мембраной, являются конденсаторами определенной емкости ( $C_M$ ). Таким образом, полное сопротивление в живом организме (импеданс) определяется свойствами клеточных мембран, а также свойствами клеточных и межклеточных жидкостей. Т.е. живая ткань обладает активным сопротивлением и емкостным.

**Импедансом**  $Z$  называется полное (суммарное) сопротивление ткани переменному току.

Так как биологические ткани обладают только активным и емкостным сопротивлениями, то при последовательном соединении этих сопротивлений (явление наблюдается при прохождении тока через поверхностно лежащие ткани) импеданс будет определяться по формуле:

$$Z = \sqrt{R^2 + R_c^2}, \quad (1)$$

где  $R$  - активное сопротивление электролита;

$R_c$  - емкостное сопротивление.

Емкостное сопротивление определяется по формуле:

$$R_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi\nu C}$$

где  $C$  - емкость клетки;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu$  - круговая частота переменного тока;

$\nu$  - линейная частота переменного тока.

Из данной формулы следует, что чем больше частота переменного тока, тем меньше емкостное сопротивление  $R_c$ . Уменьшение емкостного сопротивления приводит к уменьшению импеданса биологических тканей.

Величина, обратная сопротивлению (импедансу) ткани, через которую проходит электрический ток, называется **электропроводностью ткани**

$$K = \frac{1}{Z} \quad (2)$$

Единица измерения электропроводности – Сименс (См).

Электропроводность биологических объектов так же, как и импеданс, зависит от частоты переменного тока.

Таким образом, действие переменного тока на организм существенно зависит от его частоты.

**На низких частотах (НЧ) (порядка 50–100 Гц)** переменный ток оказывает *раздражающее действие*, т.е. под действием низкочастотного тока происходит перемещение ионов (поляризация), изменение их концентрации в разных частях клетки и межклеточного пространства, что приводит к изменению функционального состояния клетки.

**На средних частотах (СЧ) (порядка 4000–50000 Гц)** поляризация будет слабее выражена. Это позволяет применять переменный ток частотой 4000–5000 Гц для *электростимуляции*, а ток частотой 20000 – 30000 Гц применяется в *реографии*.

**Реографией** называют *диагностический метод регистрации изменений сопротивления органов, обусловленный изменением кровенаполнения*.

При реографии измеряют полное сопротивление определенного участка ткани в течение цикла сердечной деятельности. Исследование реограмм применяют в диагностике заболеваний периферических кровеносных сосудов и др.

**Переменный ток высокой частоты (ВЧ) (более 200000 Гц)** не оказывает раздражающего действия на ткани живого организма, но при этом наблюдается тепловой эффект тока. В связи с этим высокочастотные токи применяются для тепловых лечебных процедур – прогревания глубоко лежащих тканей.

Полное сопротивление живой ткани  $Z$  и ее электропроводность зависят от ее вида, физиологического состояния (кровенаполнения) и от частоты тока.

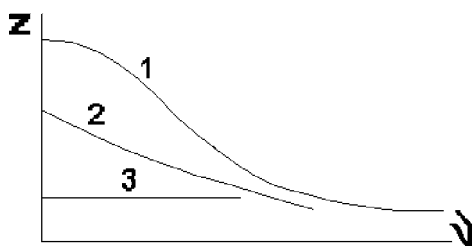


Рисунок 1 – Дисперсия импеданса

**Дисперсией электропроводности ткани** называется *зависимость электропроводности ткани от частоты переменного тока*.

**Дисперсией импеданса ткани** называется *зависимость сопротивления ткани от частоты переменного тока*.

Причина дисперсии заключается в том, что на величину сопротивления при низких частотах значительное влияние оказывает поляризация. Поскольку при увеличении частоты переменного тока уменьшаются поляризационные эффекты, то это ведет к уменьшению полного сопротивления ткани, и дисперсионная кривая обладает значительной крутизной (рисунок 1, линия 1). Исследование дисперсных кривых (рисунок 1) дает важные сведения о состоянии биологических объектов. По крутизне дисперсионной кривой можно судить о жизнеспособности той или иной ткани, что имеет большое значение, если ткань предназначена для трансплантации.

При повреждении ткани возрастает проницаемость клеточных мембран, что приводит к уменьшению полного сопротивления на низких частотах. Поэтому вторая кривая (рисунок 1, линия 2) обладает меньшей крутизной.

При отмирании ткани поляризационные эффекты практически исчезают, и зависимость сопротивления от частоты отсутствует, т.к. остается только активное сопротивление (рисунок 1, линия 3).

Действие переменного тока на организм зависит и от других параметров тока. Основным поражающим фактором является сила электрического тока, проходящего через тело человека. Сопротивление живой ткани переменному току меньше, чем постоянному.

Человек начинает ощущать воздействие переменного тока величиной 0,5-1,5 мА (миллиампер). Это порог ощутимого тока, который не представляет серьезной опасности.

Величина переменного тока в 10 ... 15 мА называется порогом неотпускающего тока. Эта величина тока при промышленной частоте 50 Гц вызывает непроизвольное сокращение мышц кисти руки и предплечья, сопровождающееся резкой болью.

Ток 40 мА поражает органы дыхания и сердечно-сосудистую систему, вызывает фибрилляцию сердца. В результате фибрилляции сердце теряет способность совершать согласованные сокращения как единое целое и в определенной последовательности. При этом может произойти остановка дыхания.

Ток 100 мА (0,1 А) считается смертельным, так как происходят немедленная остановка сердца и паралич дыхания.

В данной работе электропроводность тканей определяется методом амперметра и вольтметра. Такой метод измерения электропроводности клеток и тканей довольно широко применяется в медицине и ветеринарии при изучении процессов, происходящих при действии повреждающих факторов, при возникновении различных патологий и т.д. Удобства данного метода заключаются в том, что прикладываемое напряжение не вносит существенных изменений в физико-химические процессы в живых тканях и не повреждает их.

В ходе эксперимента импеданс вычисляется по **закону Ома для цепи переменного тока**:

$$Z = \frac{U_{эфф}}{I_{эфф}}, \quad (3)$$

где  $U_{эфф}$  – эффективное значение напряжения;  
 $I_{эфф}$  – эффективное значение силы переменного тока.

### **Порядок выполнения работы**

1. Включить звуковой генератор.
2. С помощью потенциометра установить напряжение  $U_1$ .
3. Положить руку на свинцовые электроды.
4. Изменяя частоту переменного тока от 200 до 1000 Гц, через 100 Гц измерить силу тока в цепи по микроамперметру ( $1 \text{ мкА} = 10^{-6} \text{ А}$ ).
5. Повторить измерения при напряжении  $U_2$ .



6. Вычислить по формуле (3) импеданс, а по формуле (2) электропроводность ткани.

7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

8. Построить графики зависимости электропроводности от частоты  $K=f(\nu)$  при одном и том же значении напряжения (два графика в одной системе координат).

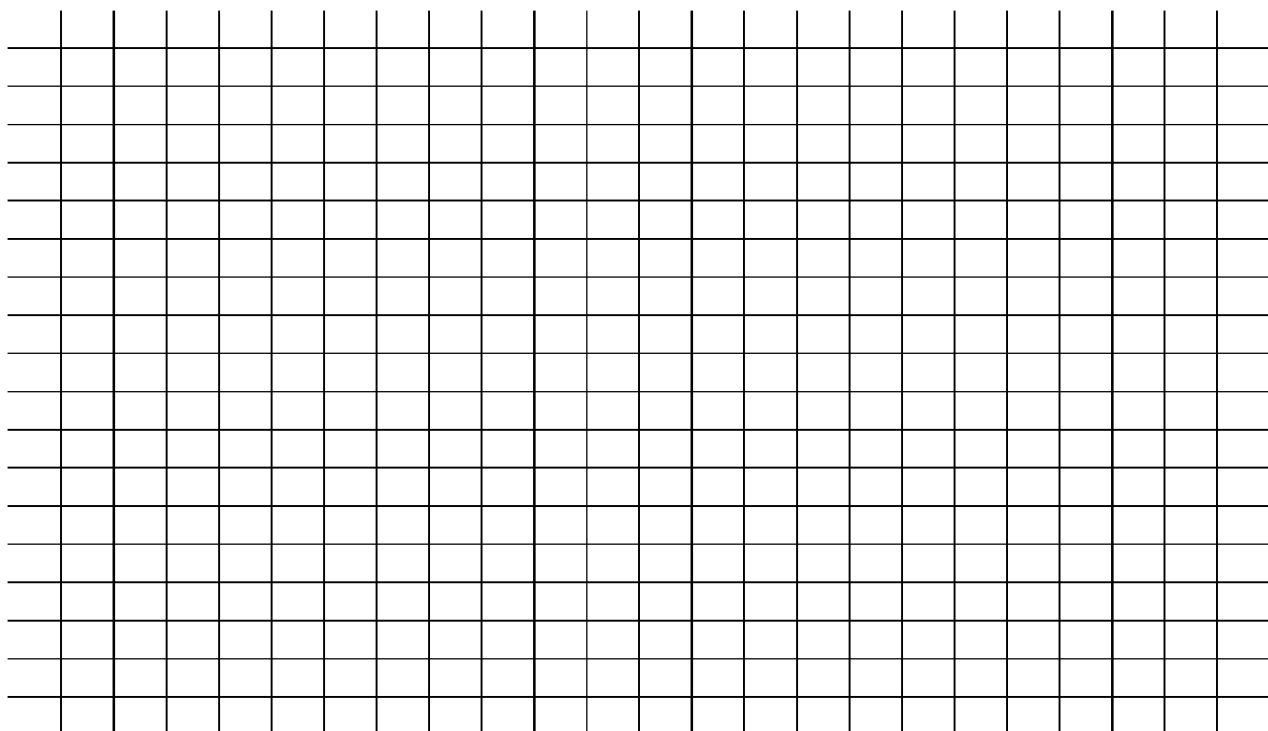
9. Сделать вывод о зависимости электропроводности ткани от частоты переменного тока.

**Таблица 1 - Результаты измерений и вычислений**

№ Опыта	$\nu$ , Гц	$U_1=$ , В			$U_2=$ , В		
		$I_{эфф.}$ , мкА	$Z$ , МОм	$K$ , мкСм	$I_{эфф.}$ , мкА	$Z$ , МОм	$K$ , мкСм
1	200						
2	300						
3	400						
4	500						
5	600						
6	700						
7	800						
8	900						
9	1000						

Место для вычислений:

### График зависимости $K=f(\nu)$



**Вывод:**

#### Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы № 4

1. Что называется переменным током?
2. Что такое импеданс?
3. Из каких сопротивлений состоит импеданс живой ткани. Какие элементы живой ткани обладают этими сопротивлениями?
4. Запишите формулу импеданса живой ткани.
5. Что такое реография? Какой ток применяют для реографии?
6. Какое действие оказывает переменный ток на живой организм в зависимости от частоты?
7. Какое действие оказывает переменный ток на живой организм в зависимости от силы тока?
8. Что называется дисперсией электропроводности (сопротивления)?
9. Дайте определение электропроводности ткани. В каких единицах измеряется электропроводность?
10. Почему при повреждении клеток ткани или при их гибели реакция импеданса ткани на смену частоты переменного тока меняется или совсем исчезает?

## Лабораторная работа №5

### Определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы

**Цель работы:** изучить теорию опыта, построение изображений предмета в собирающей линзе, научиться определять фокусное расстояние и оптическую силу собирающей линзы двумя методами.

**Приборы и принадлежности:** собирающая линза в оправе, оптическая скамья, экран с белой поверхностью, источник света, предмет в оправе.

#### Теория опыта

**Линза** - прозрачное тело, ограниченное двумя поверхностями, преломляющими световыми лучи, способные формировать оптические изображения предметов.

Линзы входят в состав разнообразных оптических приборов, широко используемых в ветеринарной практике, таких как микроскопы, эндоскопы, бронхоскопы, гастроскопы, цитоскопы и др.

#### Основные характеристики линзы:

1. **Главная оптическая ось** – прямая  $OO_1$ , проведённая через центры кривизны обеих поверхностей (рисунок 1).
2. **Оптический центр** – точка в центре линзы. Любой луч, проходящий через оптический центр линзы, не изменяет своего направления.
3. **Фокус линзы  $F$**  - это условная точка, в которой пересекаются лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси. У любой линзы имеется два фокуса по обе стороны от нее.
4. **Фокусное расстояние  $f$**  – расстояние от оптического центра линзы до точки фокуса. В СИ измеряется в метрах:  $[f] = м$

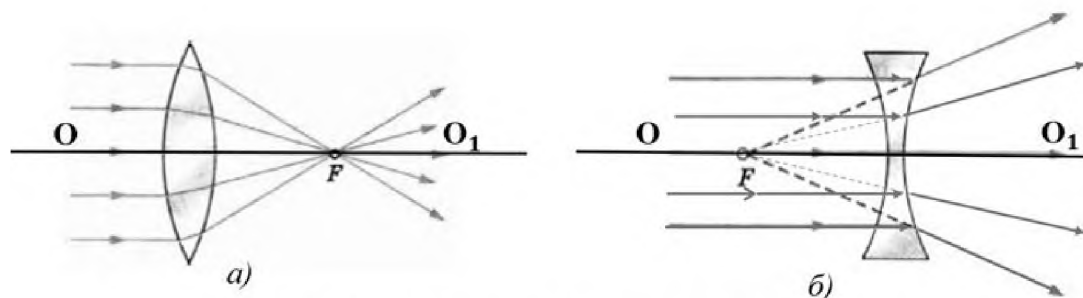


Рисунок 1 – Виды линз. Преломление в линзах

Линзы бывают **собирающие** (выпуклые) и **рассеивающие** (вогнутые).

**Собирающая линза** - это линза, в которой световые лучи (рисунок 1(а)), падающие на линзу параллельно главной оптической оси линзы  $OO_1$ , преломляются в ней и собираются в ее фокусе  $F$ .

**Рассеивающая линза** - это линза, в которой световые лучи (рисунок 1(б)), падающие на линзу параллельно главной оптической оси линзы  $OO_1$ , преломляются в ней и расходятся. Продолжения этих лучей пересекаются в главном фокусе рассеивающей линзы.

Фокусное расстояние линзы зависит от степени кривизны ее поверхностей.

Преломляющая способность линзы характеризуется *оптической силой*.

**Оптической силой линзы** называется физическая величина, обратная фокусному расстоянию линзы. Обозначается буквой  $D$ :

$$D = \frac{1}{f} \quad (1)$$

Чем меньше фокусное расстояние линзы, тем больше ее оптическая сила, т. е. тем сильнее она преломляет лучи и сильнее увеличивает.

Единицей оптической силы в СИ является метр в минус первой степени ( $\text{м}^{-1}$ ). Иначе эта единица называется *диоптрией* (дптр).

*1 дптр* — это оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м.

У собирающих и рассеивающих линз оптические силы отличаются знаком. Собирающие линзы обладают *действительным фокусом*, поэтому их фокусное расстояние и оптическая сила считаются *положительными* ( $f > 0, D > 0$ ). Рассеивающие линзы обладают *мнимым фокусом*, поэтому их фокусное расстояние и оптическая сила считаются *отрицательными* ( $f < 0, D < 0$ ).

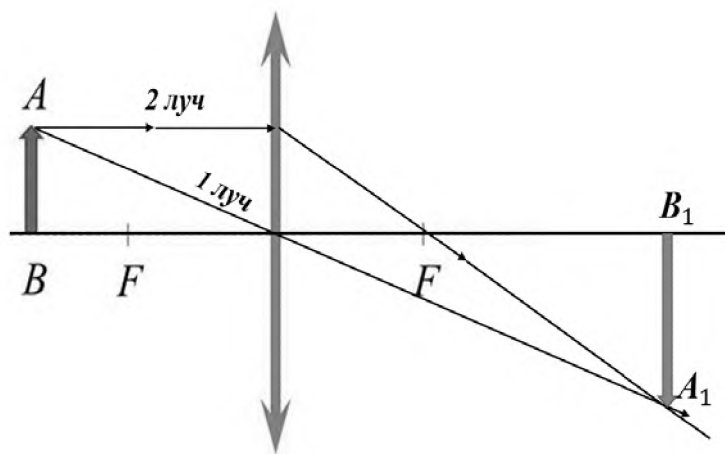
Многие оптические приборы состоят из нескольких линз. Оптическая сила системы нескольких близкорасположенных линз равна сумме оптических сил всех линз этой системы. Если, например, имеются линзы с оптическими силами  $D_1, D_2, \dots, D_n$ , то их общая оптическая сила будет равна:

$$D_{\text{сист.}} = D_1 + D_2 + \dots + D_n \quad (2)$$

### Построение изображения предмета в линзе:

Основное свойство линз — способность давать изображения предметов. Изображения бывают **прямыми** и **перевернутыми**, **действительными** и **мнимыми**, **увеличенными** и **уменьшенными**.

Положение изображения и его характер можно определить с помощью геометрических построений. Для этого используют свойства некоторых стандартных лучей, ход которых известен. Это лучи, проходящие через оптический центр или один из фокусов линзы, а также лучи, параллельные главной оптической оси. Для построения изображения в собирающей линзе (рисунок 2) от каждой точки предмета АВ проводят два луча.



построения изображения в собирающей линзе (рисунок 2) от каждой точки предмета АВ проводят два луча.

Проведем из точки А два луча: **1-й луч** пройдет через оптический центр линзы, не преломляясь;

**2-й луч** пройдет сначала параллельно главной оптической оси линзы  $OO_1$  до линзы, а затем через фокус до пересечения с первым лучом.

**Изображение предмета  $A_1B_1$**  в данном случае получается **увеличенным, перевернутым и действительным**.

Линзы широко применяются для устранения дефектов зрения: собирающие линзы – для дальнозоркости, а рассеивающие – для близорукости.

### **Задание №1. Определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы с помощью формулы тонкой линзы**

**Тонкой** называется линза, толщина которой значительно меньше радиусов, ограничивающих ее сферических поверхностей.

Для расчета положения изображения и его характера используется **формула тонкой линзы**:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (3)$$

где  $f$  - фокусное расстояние линзы;

$a$  - расстояние от предмета до линзы;

$b$  - расстояние от линзы до полученного изображения.

Выразив из формулы (3)  $f$ , мы получим выражение для нахождения **фокусного расстояния** собирающей линзы:

$$f = \frac{a \cdot b}{a + b} \quad (4)$$

#### **Порядок выполнения задания №1**

1. На оптическую скамью поставить собирающую линзу.
2. Перемещая линзу, найти положение линзы, при котором видно отчетливое изображение  $A_1B_1$  предмета  $AB$  на экране (рисунок 2).
3. Измерить линейкой расстояния от предмета до линзы  $a$  и расстояние от линзы до полученного изображения  $b$ .
4. Меняя положения экрана и линзы, повторить измерения еще два раза.
5. По формуле (4) рассчитать фокусное расстояние  $f$  собирающей линзы. Найти среднее значение фокусного расстояния  $f_{cp}$ .
6. Оценить абсолютную  $\Delta f$  и относительную  $(\Delta f_{cp} / f_{cp}) \cdot 100$  погрешности измерений.
7. Исходя из среднего значения фокусного расстояния, по формуле (1) рассчитать среднее значение оптической силы собирающей линзы  $D_{cp}$ .
8. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

**Таблица 1 - Результаты измерений и вычислений**

$N_2$	$a,$ $м$	$b,$ $м$	$f,$ $м$	$f_{cp},$ $м$	$\Delta f,$ $м$	$\Delta f_{cp},$ $м$	$\frac{\Delta f_{cp}}{f_{cp}} \cdot 100, (\%)$	$D_{cp},$ $дптр$
1								
2								
3								

## Задание №2. Определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы методом Бесселя

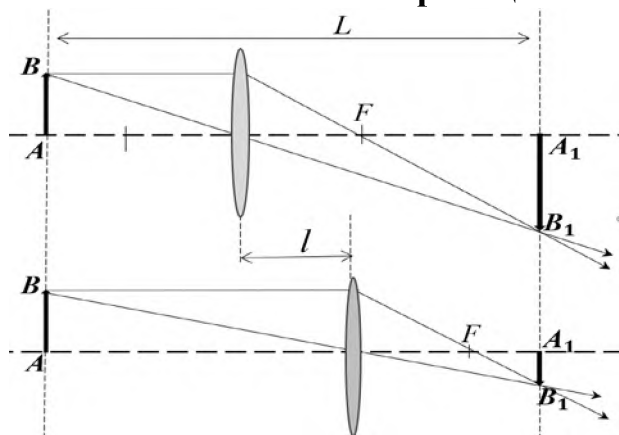


Рисунок 3 – Метод Бесселя

Указанный выше метод определения главных фокусов является приближенным. Бессель предложил точный способ нахождения главных фокусных расстояний линз. Он заключается в том, что предмет и экран остаются неподвижными, а перемещается только линза, которую нужно устанавливать в двух положениях: в первом положении линза дает увеличенное изображение, а во втором положении линза дает уменьшенное изображение (рисунок 3). При

этом расстояние между предметом и экраном должно быть достаточно большим, примерно  $4f$ .

Формула для нахождения фокусного расстояния собирающей линзы методом Бесселя:

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4 \cdot L} \quad (5)$$

где  $L$  – расстояние от предмета до изображения;

$l$  – расстояние между двумя положениями линзы, дающими увеличенное и уменьшенное изображения предмета.

### Порядок выполнения задания №2

1. На оптическую скамью поставить собирающую линзу.
2. Расположить экран и предмет таким образом, чтобы расстояние между ними было примерно  $55 \text{ см} - 70 \text{ см}$ .
3. Измерить расстояние  $L$  (рисунок 3) между экраном и предметом.
4. Перемещая линзу, получить увеличенное изображение предмета на экране, заметить по линейке положение линзы. Затем, передвигая линзу, получить уменьшенное изображение предмета. Измерить расстояние  $l$  между двумя положениями линзы.
5. Меняя положение предмета и линзы, повторить измерения еще два раза.
6. По формуле (5) вычислить фокусное расстояние собирающей линзы. Рассчитать его среднее значение. Оценить погрешности измерений.
7. Используя среднее значение фокусного расстояния, по формуле (1) рассчитать оптическую силу линзы.
8. Записать результаты измерений и вычислений в таблицу 2.

**Таблица 2 - Результаты измерений и вычислений**

$N_0$	$L,$ $m$	$l,$ $m$	$f,$ $m$	$f_{cp},$ $m$	$\Delta f,$ $m$	$\Delta f_{cp},$ $m$	$\frac{\Delta f_{cp}}{f_{cp}} \cdot 100, (\%)$	$D_{cp},$ $Дитр$
1								
2								
3								

**Вычисления к заданию № 2**

**Контрольные вопросы защиты лабораторной работы №5**

1. Что называется линзой?
2. Какие существуют виды линз? Дать им определение.
3. Дать определение фокуса и фокусного расстояния линзы.
4. Чем отличаются фокусы и фокусные расстояния собирающей и рассеивающей линз?
5. Дать определение и записать формулу оптической силы линзы.
6. Нарисовать и объяснить принцип построения изображения в собирающей линзе.
7. Объяснить принцип определения фокусного расстояния собирающей линзы с помощью формулы тонкой линзы.
8. Записать формулу тонкой линзы.
9. Объяснить принцип определения фокусного расстояния линзы методом Бесселя.
10. Записать формулу фокусного расстояния линзы методом Бесселя.

## Лабораторная работа №6

### Определение концентрации раствора сахарозы с помощью рефрактометра

**Цель работы:** изучить принцип работы и назначение рефрактометра, научиться определять концентрацию и абсолютный показатель преломления раствора сахарозы с помощью рефрактометра, установить зависимость абсолютного показателя преломления и скорости света в растворах от их концентрации.

**Приборы и принадлежности:** рефрактометр, сосуд с дистиллированной водой, сосуды с исследуемыми растворами сахарозы.

### Теория опыта

**Свет** - это электромагнитная волна.

В однородной среде свет распространяется прямолинейно. При переходе света из одной среды в другую изменяется скорость распространения световых волн, а вследствие этого изменяется и направление распространения света. В каждой среде скорость света изменяется по-разному.

Для характеристики способности вещества изменять скорость распространения электромагнитных волн используется **абсолютный показатель преломления вещества  $n$**  - величина, которая показывает, во сколько раз скорость света в вакууме больше скорости света в данной среде:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1)$$

где  $c=3 \cdot 10^8$  м/с - скорость света в вакууме.

Следовательно, **скорость света в данной среде** можно определить по формуле:

$$v = \frac{3 \cdot 10^8}{n} \quad (2)$$

Из двух сред, имеющих разные показатели преломления, среда с меньшим  $n_1$ , в которой свет распространяется быстрее, называется **оптически менее плотной**, а среда с большим показателем  $n_2$ , в которой свет распространяется медленнее, называется **оптически более плотной**.

Когда световые волны достигают границы раздела двух сред, направление их распространения изменяется. На границе раздела свет частично отражается и частично преломляется.

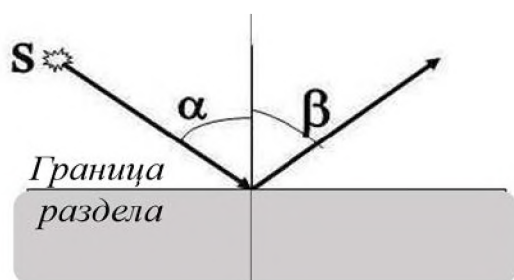


Рисунок 1 – Отражение света

**Отражение** – это явление, когда свет, попадая на границу раздела двух сред, возвращается в первоначальную среду (рисунок 1).

**Угол падения  $\alpha$**  - угол между падающим лучом и перпендикуляром.

**Угол отражения  $\beta$**  - угол между отраженным лучом и перпендикуляром.



### Законы отражения света:

1. Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости.
2. Угол отражения равен углу падения:

$$\alpha = \beta \quad (3)$$

При переходе света из одной среды в другую на границе их раздела происходит преломление (рефракция).

**Преломление** - это явление, при котором свет из одной среды переходит в другую, изменяя свое направление (рисунок 2).

**Угол преломления  $\gamma$**  - угол между преломленным лучом и перпендикуляром.

При переходе света из одной среды в другую может наблюдаться два случая:

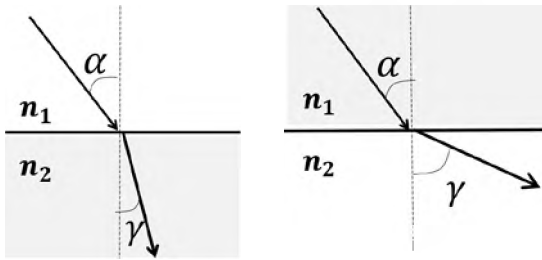


Рисунок 2 – Преломление света

1)  $n_1 < n_2$  (рисунок 2 (а)), т.е. свет переходит из оптически менее плотной среды в оптически более плотную, например, из воздуха в стекло. При этом угол падения света  $\alpha$  больше угла преломления  $\gamma$ .

2)  $n_1 > n_2$  (рисунок 2 (б)), т.е. свет переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, например, из стекла в воздух. При этом угол падения света  $\alpha$  меньше угла преломления  $\gamma$ .

При этом угол падения света  $\alpha$  меньше угла преломления  $\gamma$ .

### Законы преломления света:

1. Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости.
2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, равная отношению показателю преломления данных двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (4)$$

**Относительный показатель преломления** показывает, во сколько раз скорость света в первой среде больше скорости света во второй:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (5)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – абсолютные показатели преломления первой и второй сред.

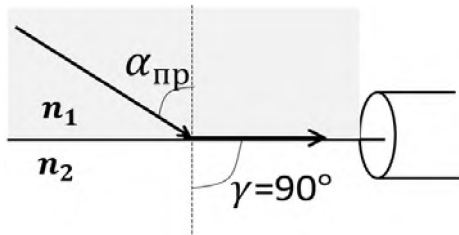


Рисунок 3 - Полное внутреннее отражение света

Рассмотрим случай, когда, свет переходит из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную. В этом случае, угол преломления будет больше угла падения. При увеличении угла падения света угол преломления будет тоже увеличиваться. При определенном угле падения, называемом **предельным углом полного внутреннего отражения  $\alpha_{пр}$** , угол преломления  $\gamma$

станет равен  $90^\circ$  (рисунок 3).

Явление, при котором при переходе света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную угол преломления равен  $90^\circ$ , называется **явлением полного внутреннего отражения**.

Определим предельный угол полного внутреннего отражения. Запишем второй закон преломления:  $\frac{\sin \alpha_{np.}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$ . Так как  $\sin 90^\circ = 1$ , то закон преломления для случая полного внутреннего отражения примет вид:

$$\sin \alpha_{np.} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (6)$$

На явлении полного внутреннего отражения света работают приборы, называемые **рефрактометрами**. С помощью рефрактометра определяют абсолютный показатель преломления и концентрацию растворенного вещества, например, содержание белка в сыворотке крови.

Основной частью рефрактометра являются две прямоугольные призмы, сделанные из одного и того же сорта стекла. Призмы прикасаются гранями, между которыми имеется зазор примерно 0,1 мм (рисунок 4).

Свет проходит через осветительную призму, рассеиваясь ее матовой гранью, затем поступает в исследуемую жидкость и преломляется на ее границе с измерительной призмой.

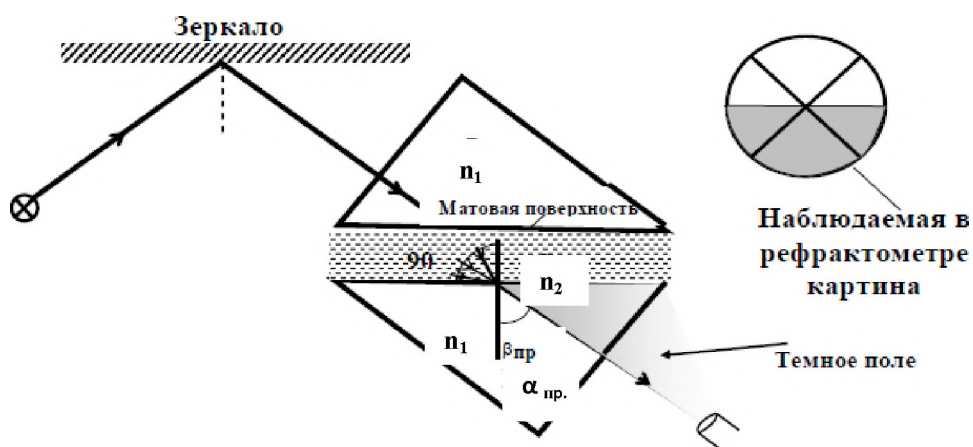


Рисунок 4 – Ход лучей в рефрактометре

При определении показателя преломления прозрачной жидкости свет в измерительной призме проходит в пределах угла от 0 до  $\alpha_{пр.}$

Пространство внутри этого угла будет освещенным, а вне его – темным. Таким образом, поле зрения, видимое в зрительную трубу, разделено на две части: темную и светлую. Положение границы раздела света и тени определяется предельным углом преломления, величина которого зависит от показателя преломления исследуемой жидкости.

В медицине и ветеринарии рефрактометры используются как анализаторы состава газов и жидких растворов. В настоящее время явление полного внутреннего отражения нашло широкое применение в волоконной оптике.

**Порядок выполнения работы**  
**Задание №1. Определение нуля пункта прибора**

1. Открывают верхнюю камеру, промывают и вытирают досуха соприкасающиеся плоскости призмы.
2. Наносят стеклянной палочкой на поверхность измерительной призмы 1-2 капли дистиллированной воды.
3. Поворачивая окуляр, добиваются четкого изображения поля зрения.
4. Глядя в окуляр, перемещают источник света, добиваясь наибольшей контрастности поля зрения.
5. Совмещают визирную линию с границей светотени, перемещая рукоятку.
6. По левой шкале отсчитывают нульпункт прибора (т.е. показатель преломления дистиллированной воды), а по правой шкале – концентрацию (в случае дистиллированной воды концентрация равна нулю).

**Задание №2. Определение показателя преломления и концентрации растворов сахарозы**

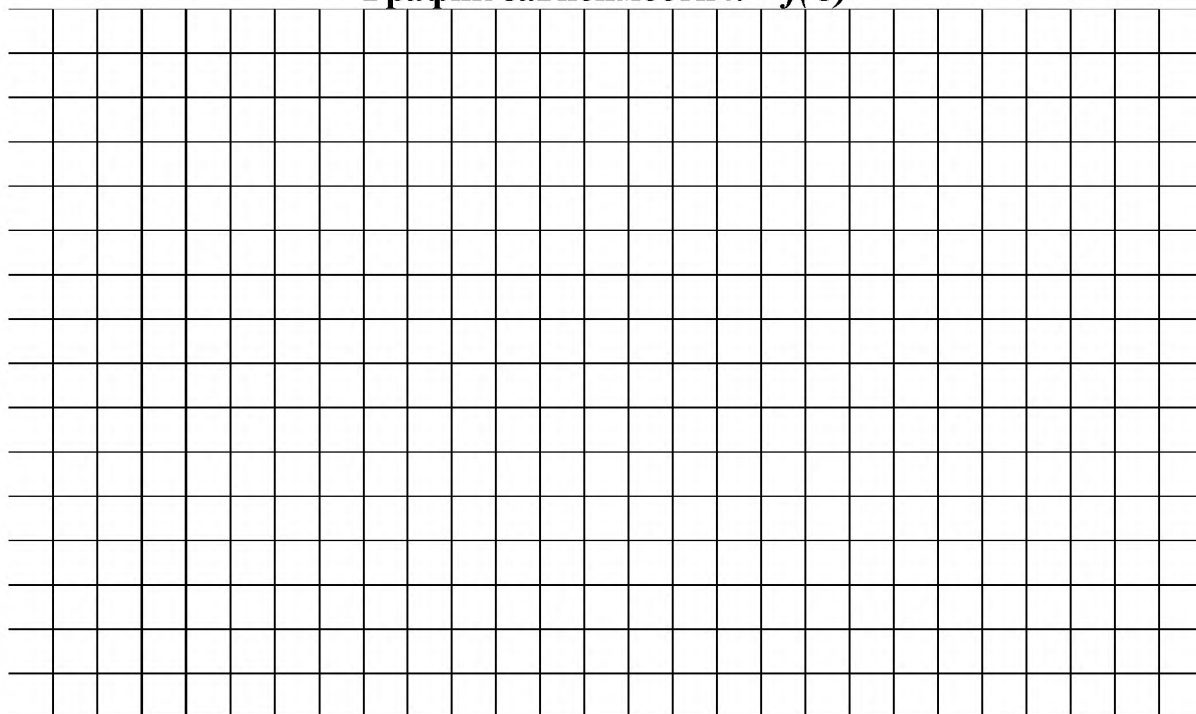
1. На поверхность измерительной призмы наносят 1-2 капли исследуемого раствора в порядке номеров, указанных на сосудах (№№1, 2, 3, 4, 5).
2. Глядя в окуляр, по левой шкале отсчитывают показатель преломления данного раствора, а по правой - его концентрацию.
3. По формуле (2) определить скорость света в растворах с различной концентрацией.
4. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

**Таблица - Результаты измерений и вычислений**

<i>№ раствора</i>	<i>n</i>	<i>C, %</i>	<i>v, 10<sup>8</sup> м/с</i>
<i>Дист. вода</i>			
1			
2			
3			
4			
5			

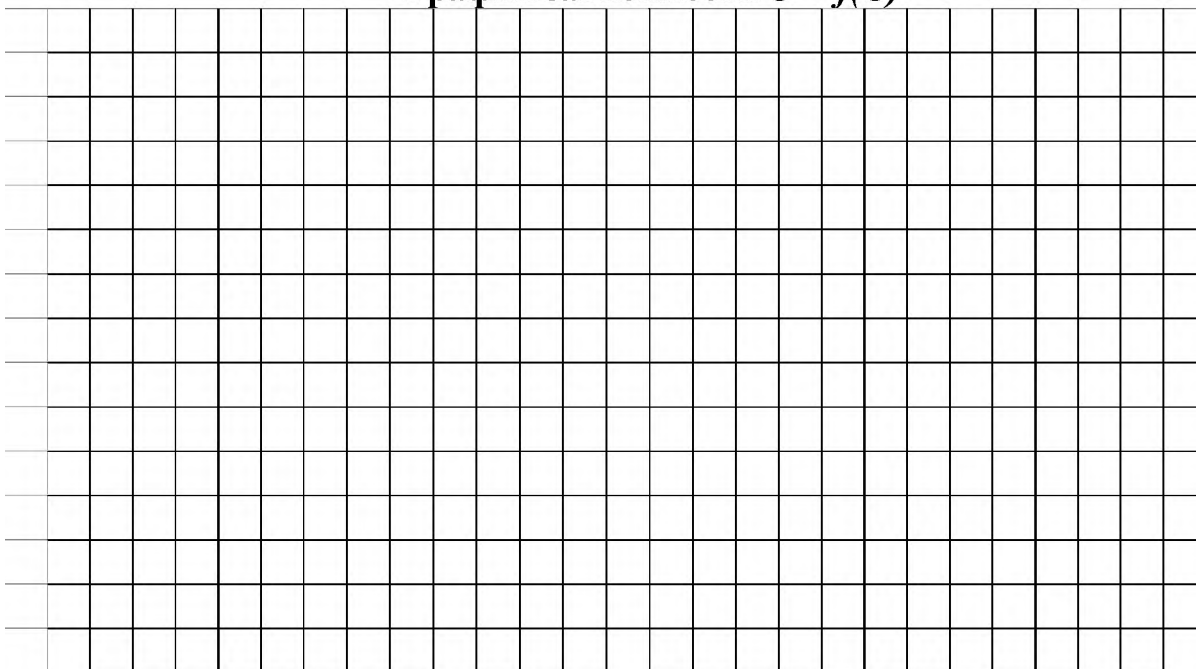
5. Построить график зависимости показателя преломления от концентрации  $n = f(C)$ .
6. Построить график зависимости скорости света в растворе от концентрации  $v = f(C)$ .
7. Сделать выводы о зависимости показателя преломления и скорости света в растворах от их концентрации.

**График зависимости  $n = f(C)$**



**Вывод:**

**График зависимости  $\nu = f(C)$**



**Вывод:**

## Контрольные вопросы защиты лабораторной работы №7

1. Дать определение и записать формулу абсолютного показателя преломления.
2. Дать определение оптически более плотной и оптически менее плотной среды.
3. Дать определение явлению отражения света.
4. Сформулировать законы отражения.
5. Дать определение явлению преломления света.
6. Нарисовать и объяснить два случая преломления света.
7. Сформулировать законы преломления света.
8. Дать определение и записать формулу относительного показателя преломления среды.
9. Нарисовать и объяснить случай полного внутреннего отражения света.
10. Записать и объяснить закон преломления для явления полного внутреннего отражения света.

## Лабораторная работа №7

### Определение длины световой волны при помощи дифракционной решетки

**Цель работы:** изучить явления интерференции и дифракции света, научиться определять постоянную дифракционной решетки и длину волны монохроматического света при помощи дифракционной решетки.

**Приборы и принадлежности:** дифракционная решетка, источник света, линейка с вертикальной шкалой, набор светофильтров.

#### Теория опыта

Все электромагнитные волны имеют общую природу и отличаются друг от друга только длиной волны или частотой.

Волновые свойства света проявляются в явлениях интерференции, дифракции, поляризации и др.

**Интерференцией света** называют явление, возникающее при наложении световых волн друг на друга, в результате чего в точке наложения происходит усиление (*max*) или ослабление (*min*) интенсивности света.

Явление интерференции наблюдается только при сложении когерентных волн.

**Когерентные волны** – это волны, у которых одинаковые частоты, а разность фаз между колебаниями с течением времени не изменяется.

В природе когерентных источников не существует, поэтому когерентные волны получают разделением и последующим сведением световых лучей, исходящих из одного и того же источника. Практически это можно получить с помощью экранов и щелей, зеркал и преломляющих тел.

Интенсивность света в области наложения световых волн имеет характер чередующихся светлых и темных полос.

Наличие *max* или *min* в данной точке зависит от **оптической разности хода волн**  $\Delta l$  (Рисунок 1):

$$\Delta l = l_2 - l_1, \quad (1)$$

где  $l_1$  - длина пути одного луча,  
 $l_2$  - длина пути другого луча.

В тех точках, в которые интерферирующие волны приходят в одинаковой фазе, интенсивность света увеличивается.

**Максимум интенсивности** при интерференции наблюдается, если **оптическая разность хода равна нулю или четному числу полуволн:**

$$\Delta l = (2k) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  
 $k$  - целое число.

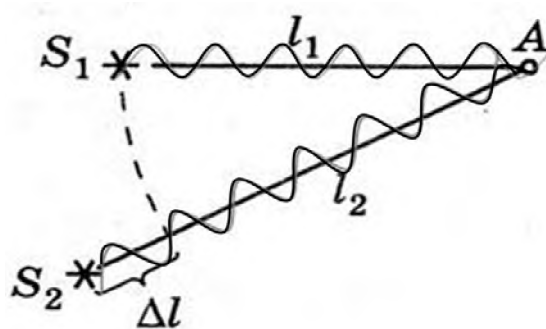


Рисунок 1 – Интерференция света

В тех точках, в которые волны приходят в противофазе волны гасят друг друга и наблюдается уменьшение интенсивности света.

*Минимум интенсивности при интерференции наблюдается тогда, когда оптическая разность хода равна нечетному числу полуволн.*

$$\Delta l = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

Если на пути световой волны попадают мелкие предметы или щели, то можно наблюдать дифракцию света.

**Дифракция** – отклонение распространения волн от законов геометрической оптики вблизи препятствий (огибание волнами препятствий) (рис. 2).

Дифракционная картина часто возникает в естественных условиях, например цветные кольца, окружающие источник света, наблюдаемые сквозь туман, обусловлены дифракцией света на водяных каплях.

Наблюдать четкую дифракционную картину можно при помощи дифракционной решетки.

**Дифракционная решетка** – это оптическое устройство, представляющее собой совокупность большого числа узких параллельных щелей, разделенных непрозрачными для света промежутками.

Дифракционную решетку можно получить нанесением непрозрачных царапин (штрихов) на стеклянную пластину, при этом щели будут пропускать свет, а штрихи – рассеивают и не пропускают свет.

**Период дифракционной решетки  $d$**  – суммарная ширина прозрачного ( $a$ ) и непрозрачного ( $b$ ) участков:

$$d = a + b.$$

Пусть на дифракционную решетку падает пучок параллельных лучей перпендикулярно плоскости решетки (рис. 3). При прохождении света через дифракционную решетку образуется множество когерентных волн, которые распространяются по всем направлениям, наблюдается дифракция света. За решеткой помещают собирающую линзу, в фокусе которой располагается экран. Линза фокусирует лучи, идущие параллельно, в одной точке.

В этой точке происходит сложение волн и их взаимное усиление (max) и ослабление (min). На экране в месте наложения лучей будет наблюдаться интерференционная картина (чередование светлых и темных полос).

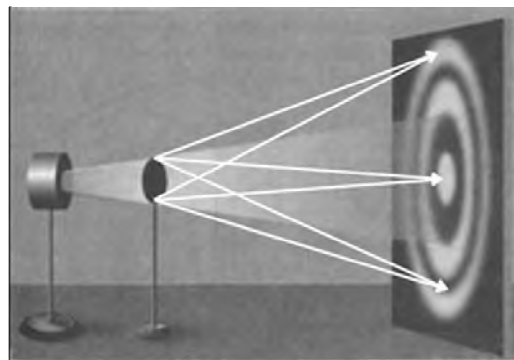


Рисунок 2 - Дифракция света

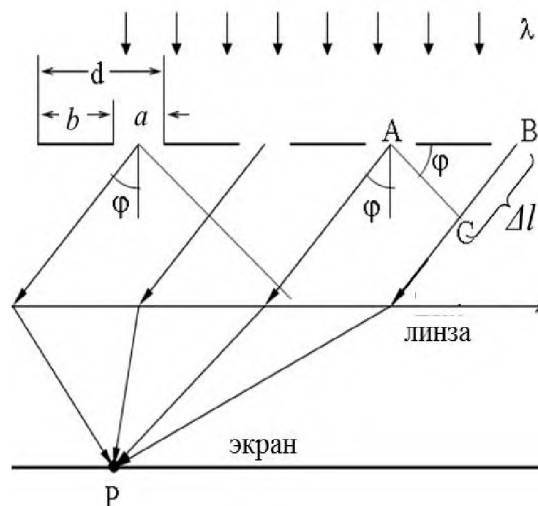


Рисунок 3 - Наблюдение дифракции при помощи дифракционной решетки

Угол, на который отклоняется луч от первоначального направления, называется **углом дифракции  $\varphi$** . Угол дифракции тем больше, чем больше длина волны и чем меньше толщина щели.

Угол дифракции тем больше, чем больше длина волны и чем меньше толщина щели.

В зависимости от разности хода лучей в точке Р может наблюдаться *max* или *min*.

**Условие максимума:** максимумы будут наблюдаться в направлении тех углов, для которых на разности хода укладывается целое число длин волн:

$$d \cdot \sin \varphi_{\max} = k \cdot \lambda, \quad (4)$$

где число  $k = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$  называется **порядком спектра**.

Если  $k = 0$ , то будет центральный максимум. Формулу (5) называют **формулой дифракционной решетки**.

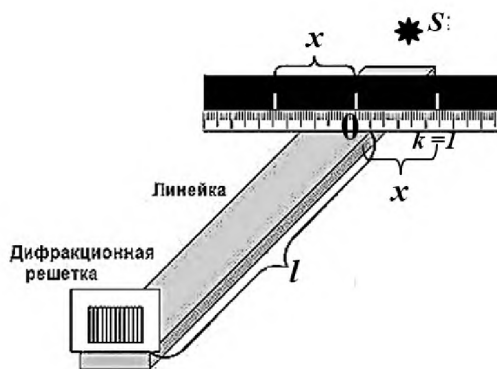
**Условие минимума:** минимум будет наблюдаться в направлении тех углов, для которых на разности хода укладывается нечетное число длин половин:

$$d \cdot \sin \varphi_{\min} = (2 \cdot k + 1) \cdot \lambda / 2 \quad (5)$$

Если на решетку падает белый свет, то направления, при которых наблюдаются максимумы для разных длин волн, будут различными, что очевидно из формулы (5). Поэтому при дифракции произойдет разложение белого света в спектр. На месте каждого максимума, кроме центрального, будет сплошной спектр, обращенный фиолетовым концом к центру.

Целью данной лабораторной работы является определение длины световых волн в различных областях спектра при помощи дифракционной решетки. Схема установки показана на рисунке 4.

Простейшее измерительное устройство состоит из двух линеек, на одной из которых закреплена дифракционная решетка (обращенная к глазу), а над второй находится узкая щель (обращена к источнику света, в которой подвижно закреплены различные светофильтры). Глядя через дифракционную решетку, мы увидим на



темной шкале по обе стороны прорези спектры 1-го, 2-го, 3-го и более высоких порядков. Порядок спектра определяется последовательным счетом от центрального максимума (точка О).

**Рисунок 4 - Установка для определения длины световых волн при помощи дифракционной решетки**

Если на пути света поставить светофильтр, то вместо спектров будут наблюдаться максимумы только одного определенного цвета, т.е. максимумы, соответствующие определенной длине волны света  $\lambda$ .

Для того чтобы определить длину световой волны, необходимо найти период дифракционной решетки  $d$ .



Если измерить расстояние  $l$  от дифракционной решетки до линейки со щелью, и расстояние от щели - максимума нулевого порядка (0) до максимума первого порядка ( $k=1$ ), второго и третьего порядка, то период дифракционной решетки можно определить по формуле:

$$d = \frac{k \cdot \lambda \cdot l}{x} \quad (6)$$

Выражая из формулы (8)  $\lambda$ , получим формулу для нахождения длины волны света при помощи дифракционной решетки:

$$\lambda = \frac{d_{cp} \cdot x}{k \cdot l} \quad (7)$$

### Порядок выполнения работы

#### Задание №1. Определение периода дифракционной решетки

1. Включить источник света в электрическую сеть.
2. Вставить в рамку дифракционную решетку так, чтобы ее штрихи были направлены параллельно щели на вертикальной линейке.
3. Перекрыть ход световых лучей от источника света к решетке красным светофильтром (с помощью светофильтров в вертикальной линейке). Длина волны красного цвета  $\lambda=700$  нм.
4. Измерить расстояние  $l$  от решетки до линейки и расстояние  $x$  от центрального максимума (точка O) до максимума 1, 2 и 3 порядка.
5. По формуле (6) рассчитать период дифракционной решетки.
6. Рассчитать среднее значение периода дифракционной решетки, абсолютную и относительную погрешности.
7. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

Таблица 1 - Результаты измерений и вычислений

№	$k$	$\lambda$ , нм	$l$ , м	$x$ , м	$d$ , нм	$d_{cp}$ , нм	$\Delta d$ , нм	$\Delta d_{cp}$ , нм	$\frac{\Delta d_{cp}}{d_{cp}} \cdot 100, (\%)$
1	1	700							
2	2								
3	3								

#### Задание №2. Определение длины световой волны

1. Считая период дифракционной решетки известным из первого задания, занести его среднее значение во вторую таблицу.
2. Поставить на пути света от источника светофильтр, длину волны света которого вы хотите определить (зеленый или синий).
3. Измерить аналогично заданию №1 расстояния  $l$  и  $x$  для данного света.
4. По формуле (7) рассчитать неизвестную длину волны.
5. Рассчитать среднее значение длины волны, абсолютную и относительную погрешности измерений.
6. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

**Таблица 2 - Результаты измерений и вычислений**

$N_0$	$k$	$d_{ср.},$ $нм$	$l,$ $м$	$x,$ $м$	$\lambda,$ $Нм$	$\lambda_{ср.},$ $нм$	$\Delta\lambda,$ $нм$	$\Delta\lambda_{ср.},$ $нм$	$\frac{\Delta\lambda_{ср.}}{\lambda_{ср.}} \cdot 100, (\%)$
1	1								
2	2								
3	3								

**Вычисления к заданиям**

**Контрольные вопросы защиты лабораторной работы № 7**

1. Что называется интерференцией света?
2. Какие волны называют когерентными? Как их получают?
3. Дайте определение и запишите формулу оптической разности хода волн.
4. Напишите и сформулируйте условия *max* и *min* света при интерференции.
5. Дайте определение явлению дифракции света?
6. Дайте определение угла дифракции.
7. Что представляет собой дифракционная решетка?
8. Дайте определение периода дифракционной решетки?
9. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля.
10. Напишите и сформулируйте условия *max* и *min* света при дифракции.

## Лабораторная работа №8

### Изучение основных законов внешнего фотоэффекта

**Цель работы:** изучить основные законы внешнего фотоэффекта; устройство фотоэлементов; научиться снимать световую, вольтамперную и спектральную характеристики фотоэлемента; установить зависимости: фототока от светового потока, силы тока от напряжения и коэффициента чувствительности от длины волны.

**Приборы и принадлежности:** фотоэлемент, микроамперметр, выпрямитель, источник света, вольтметр, реостат, линейка, провода.

#### Теория опыта

**Фотоэффект** – явление выбивания электронов из атомов или молекул вещества под действием электромагнитного излучения.

Впервые фотоэффект был обнаружен в 1887 г. немецким физиком Г. Герцем, что явилось экспериментальным обоснованием квантовой теории света.

Фотоэффект бывает 2-х видов: *внешний* и *внутренний*.

Если оторванные от своих атомов или молекул электроны остаются внутри вещества в качестве свободных носителей заряда, то фотоэффект называется **внутренним**. Внутренний фотоэффект наблюдается в некоторых полупроводниках и в меньшей степени - у диэлектриков.

Если электроны, выбитые электромагнитным излучением, вылетают за пределы вещества, фотоэффект называют **внешним**. Внешний фотоэффект наблюдается главным образом у металлов.

Явление внешнего фотоэффекта впервые было исследовано в 1890 г. русским физиком Столетовым А.Г.

Схема опытов Столетова по изучению внешнего фотоэффекта изображена на рисунке 1. В вакуумной трубке помещают отрицательно заряженный катод (К) и положительно заряженный анод (А), которые подключены к источнику напряжения. При освещении катода свет вырывает из него электроны, называемые **фотоэлектронами**. Под действием напряжения освобожденные электроны двигаются к аноду. В цепи появляется ток, называемый **фототоком**.

При небольшом значении напряжения появляется слабый фототок. При повышении напряжения фототок увеличивается. Анода достигает большее количество электронов, вылетающих из катода. При определенном значении напряжения ток достигает наибольшего значения  $I_H$ , получившего название **тока насыщения**, и дальше перестает возрастать. Это происходит из-за того, что напряжение, ускоряющее электроны, становится настолько велико, что анод

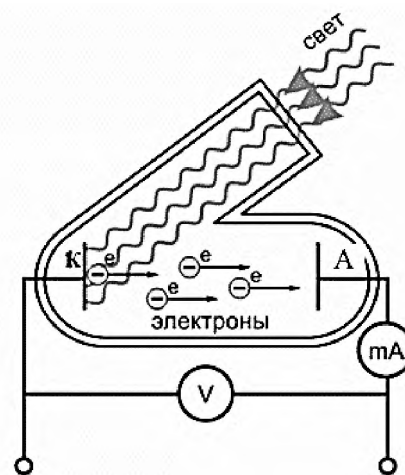


Рисунок 1 - Вид установки для наблюдения внешнего фотоэффекта

захватывает вообще все электроны, выбитые из катода — в каком бы направлении и с какими бы скоростями они не начинали движение.

Величина  $I_n$  тока насыщения определяется количеством электронов, выбиваемых из катода за одну секунду.

Экспериментальные исследования, выполненные Столетовым, привели к установлению основных законов внешнего фотоэффекта:

**Первый закон фотоэффекта:**

Сила фототока насыщения  $I_n$ , пропорциональна световому потоку (интенсивности излучения), падающему на катод:

$$I_n = k \cdot \Phi, \quad (1)$$

где  $k$  называется фоточувствительностью освещаемой поверхности и выражается в микроамперах на люмен (мкА /лм).

**Второй закон фотоэффекта:**

Скорость фотоэлектронов возрастает с увеличением частоты падающего света и не зависит от его интенсивности.

**Третий закон фотоэффекта:**

Независимо от интенсивности светового потока фотоэффект начинается только при определенной (для данного металла) минимальной частоте света, называемой **красной границей** фотоэффекта.

Законы фотоэффекта были объяснены на основе квантовой теории света.

Согласно этой теории, излучение и поглощение света происходит порциями-квантами электромагнитных волн, названными фотонами. А. Эйнштейн предположил, что свет не только излучается и поглощается, но и распространяется в виде потока фотонов (квантов), энергия каждого из которых равна:

$$E_\phi = h \cdot \nu, \quad (2)$$

где  $\nu$  — частота света;

$h = 6,6210 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка.

Энергия  $E_\phi$  поглощенного фотона передается целиком только одному

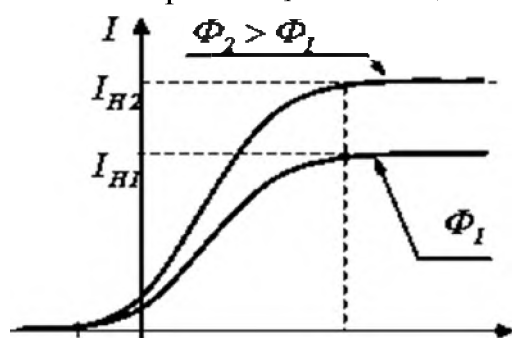


Рисунок 2 - График зависимости силы тока от светового потока

электрону. Увеличение светового потока означает увеличение числа падающих фотонов, которые выбивают с поверхности металла больше электронов. Это объясняет прямую зависимость между световым потоком (интенсивностью падающего света) и силой фототока (рисунок 2).

При столкновении с электроном фотон полностью передает ему свою энергию. Часть энергии фотона расходуется на совершение работы выхода электрона из вещества, оставшаяся часть сообщается электрону в виде кинетической энергии. Каждый электрон выбивается из металла одним фотоном, поэтому его скорость определяется лишь энергией фотона, т.е. частотой падающего света.

**Работа выхода** - это работа, которую необходимо совершить, чтобы удалить электрон из металла.

Таким образом, энергия фотона расходуется на совершение работы по выходу электрона из вещества и сообщение ему кинетической энергии:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{m\nu^2}{2}, \quad (3)$$

где  $h$  - постоянная Планка;

$\nu$  – частота;

$A_{\text{вых}}$  – работа выхода электрона из вещества;

$\frac{m \cdot \nu^2}{2}$  - кинетическая энергия выбитых электронов;

$m$  – масса электрона;

$\nu$  – скорость электрона.

Равенство (3) называется **уравнением Эйнштейна** для фотоэффекта.

Из данного уравнения видно, что фотоэффект возможен, если энергия фотона больше или равна работе выхода электрона ( $h\nu \geq A_{\text{вых}}$ ), если  $h\nu < A_{\text{вых}}$ , то энергия фотона будет недостаточна для вырывания электрона из металла.

*Приборы, в которых фотоэффект используется для превращения энергии излучения в электрическую энергию, называются **фотоэлементами**.*

Простейшим таким прибором является вакуумный фотоэлемент. Применяется в фотометрии для измерения силы света, яркости, освещенности, в кино для воспроизведения звука, в фототелеграфах, в управлении производственными процессами.

Существуют полупроводниковые фотоэлементы, в которых под действием света происходит изменение концентрации носителей тока. Они используются при автоматическом управлении электрическими цепями (например, в турникетах метро), в цепях переменного тока, используются в солнечных батареях на искусственных спутниках Земли, межпланетных и орбитальных автоматических станциях.

Важнейшими характеристиками фотоэлемента являются световая, вольт-амперная и спектральная, которые изучаются в данной работе.

**Световой характеристикой** называется зависимость фототока (при заданном напряжении на электродах фотоэлемента) от светового потока, т.е.  $I = f(\Phi)$ .

**Вольтамперной характеристикой** называется зависимость тока от напряжения на электродах фотоэлемента при постоянном световом потоке:  $I = f(U)$ , при  $\Phi = \text{const}$ .

Интенсивность фотоэффекта зависит, как было показано выше, от длины волны падающего света. При одной и той же мощности излучения сила тока насыщения  $I_n$  получается различная для разных длин волн.

**Спектральной характеристикой** называется зависимость чувствительности фотоэлемента от длины волны падающего света.

### Порядок выполнения работы

#### Задание №1. Снятие световой характеристики фотоэлемента

1. Включить источник света.
2. Установить постоянное напряжение на фотоэлементе ( $U = 30 \text{ В}$ ).
3. Измерить величину фототока  $I$  при различных расстояниях  $r$  от источника света до фотоэлемента.
4. Рассчитать значения светового потока  $\Phi$ , падающего на фотокатод, при различных расстояниях  $r$  по формуле:  $\Phi = \frac{J \cdot S}{r^2}$ ,

где  $S$  – площадь фотокатода;

$J$  – сила света;

$r$  – расстояние.

Величину освещаемой поверхности фотокатода принять равной  $S = 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ . Сила источника света  $J = 20 \text{ кд}$ .

5. Данные измерений и вычислений занести в таблицу 1.

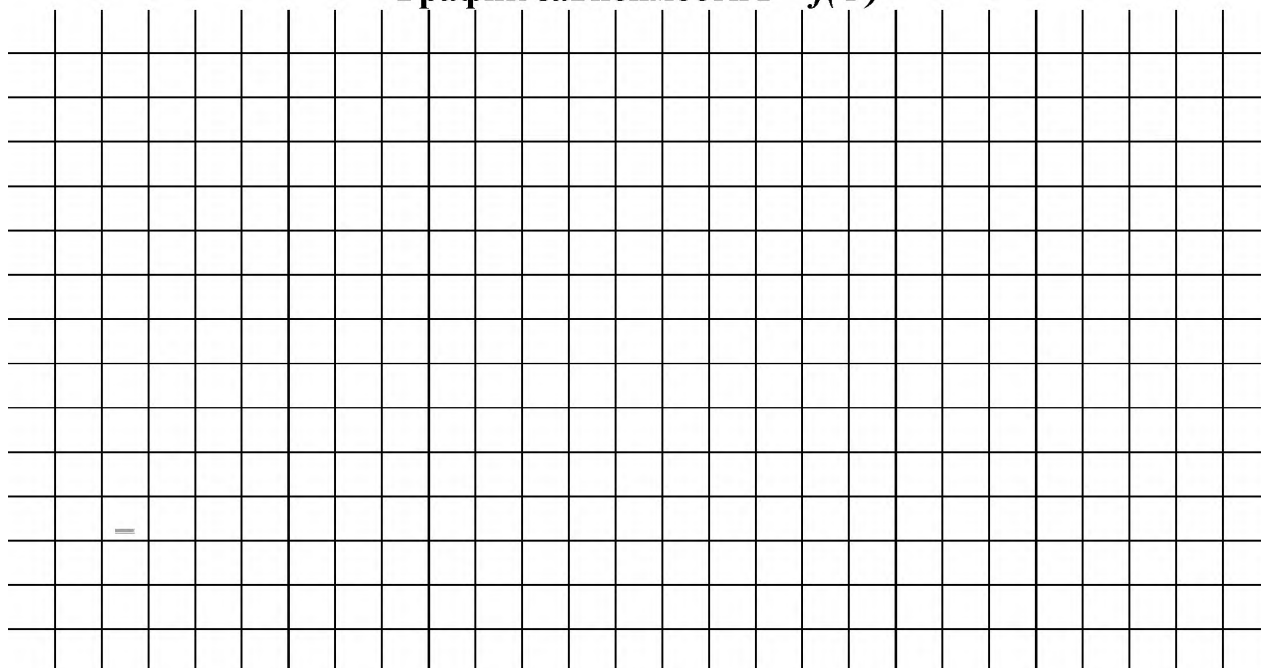
Таблица 1 – Результаты измерений и вычислений

Расстояние	$r$ , м				
Световой поток	$\Phi$ , лм				
Фототок	$I$ , мкА				

6. Построить график зависимости фототока от светового потока  $I = f(\Phi)$ .

7. Сделать вывод о зависимости фототока от светового потока.

#### График зависимости $I = f(\Phi)$



**Вывод:**

**Задание №2. Снятие вольтамперной характеристики фотоэлемента**

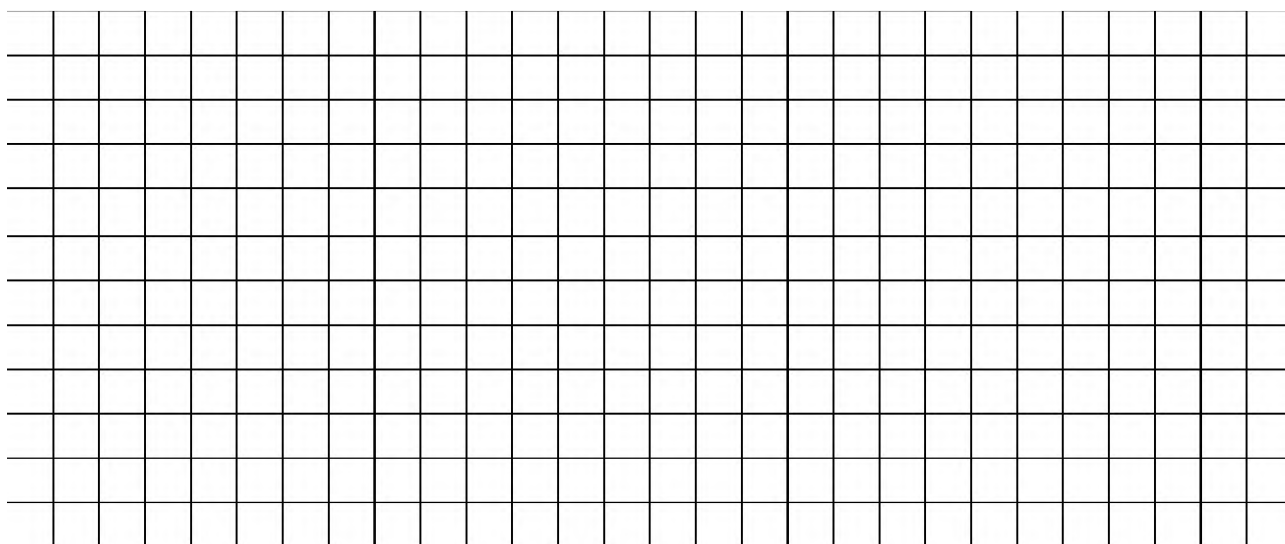
1. Включить источник света.
2. Установить фотоэлемент на расстоянии  $r_1$  от источника света.
3. Измерить фототок при различном напряжении на фотоэлементе (напряжение изменять через 5 В) при постоянном световом потоке.
4. Аналогично измерить фототок при расстоянии  $r_2$ .
5. Вычислить  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  (пункт 4 в первом задании).
6. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 2.

**Таблица 2 – Результаты измерений и вычислений**

$r_1 =$			$r_2 =$		
$U, В$	$I_1, мкА$	$\Phi_1, лм$	$U, В$	$I_2, мкА$	$\Phi_2, лм$
5			5		
10			10		
15			15		
20			20		
25			25		
30			30		

7. Построить график зависимости фототока от напряжения  $I = f(U)$  для двух случаев светового потока (в одной системе координат).
8. Сделать вывод о зависимости силы тока от напряжения.

**График зависимости  $I = f(U)$**



**Вывод:**

### Задание №3. Снятие спектральной характеристики фотоэлемента

1. Включить источник света.
2. Установить напряжение на электродах фотоэлемента 30 В.
3. Установить в держателе красный светофильтр. Длину волны определить по таблице 4.
4. Измерить величину фототока для этого светофильтра при расстоянии  $r_1$ .
5. Аналогичные измерения произвести и для остальных светофильтров.
6. Рассчитать чувствительность фотоэлемента для различных длин волн по формуле  $k = \frac{I}{\Phi}$
7. Аналогичные измерения произвести при расстоянии  $r_2$ .
8. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.

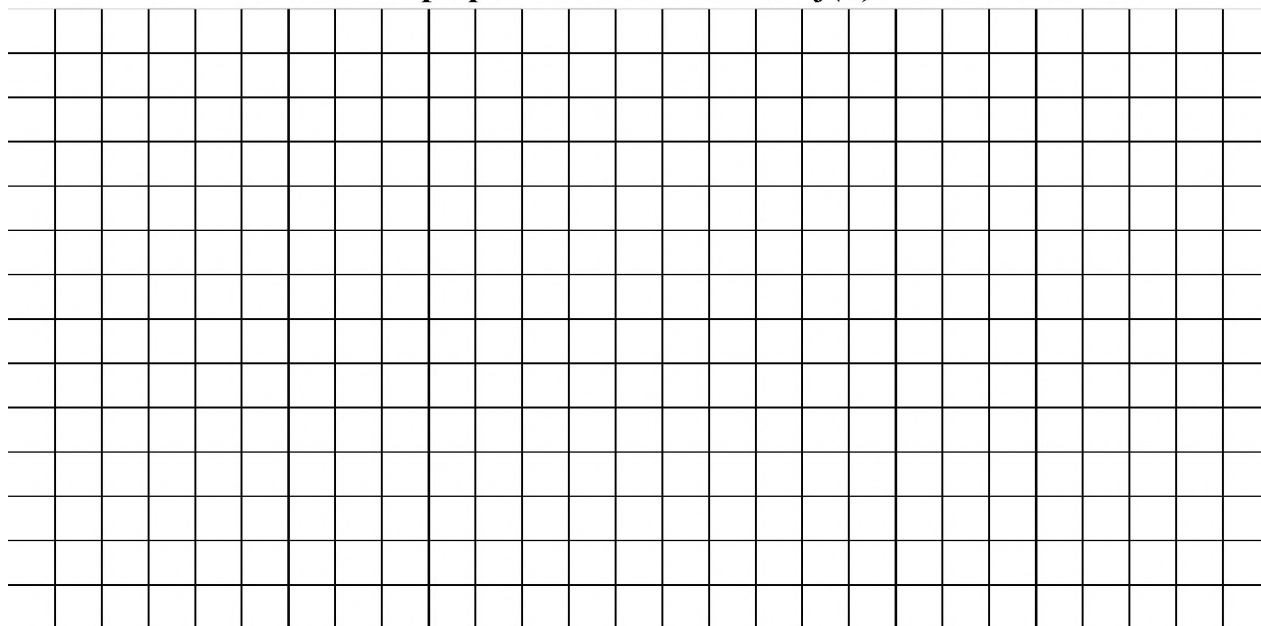
Таблица 3 – Результаты измерений и вычислений

$r$ , м	$r_1 =$ ; $\Phi_1 =$			$r_2 =$ ; $\Phi_2 =$		
$\lambda$ , нм						
$I$ , мкА						
$k$ , мкА/лм						

9. Построить графики зависимости чувствительности фотоэлемента от длины волны  $k = f(\lambda)$  для двух расстояний в одной системе координат.

10. Сделать вывод о зависимости коэффициента чувствительности от длины волны.

#### График зависимости $k = f(\lambda)$



**Вывод:**



**Таблица 4 - Средняя длина волны спектрального участка  
для различных светофильтров**

<b>№</b>	<b>Цвет</b>	<b><math>\lambda_{\text{ср.}}</math>, нм</b>
<b>1</b>	<b>Красный</b>	<b>760</b>
<b>2</b>	<b>Оранжевый</b>	<b>620</b>
<b>3</b>	<b>Желтый</b>	<b>580</b>
<b>4</b>	<b>Зеленый</b>	<b>550</b>
<b>5</b>	<b>Голубой</b>	<b>490</b>
<b>6</b>	<b>Синий</b>	<b>450</b>
<b>7</b>	<b>Фиолетовый</b>	<b>410</b>

### **Контрольные вопросы защиты лабораторной работы № 8**

1. Что называют фотоэффектом?
2. Дайте определение внешнего фотоэффекта.
3. Дайте определение внутреннего фотоэффекта.
4. Дайте определение фототока, фототока насыщения. От чего зависит его величина?
5. Сформулируйте и объясните первый закон фотоэффекта.
6. Сформулируйте и объясните второй закон фотоэффекта.
7. Сформулируйте и объясните третий закон фотоэффекта.
8. Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
9. Что представляют собой фотоэлементы? Где они применяются?
10. Назовите и дайте определение характеристикам фотоэлемента.

## Приложение 1

### Приставки для обозначения десятичных кратных и дольных единиц

Название приставки	Обозначение	Коэффициент умножения	Пример
Экса	Э	$10^{18}$	Эксаметр (Эм)
Пета	П	$10^{15}$	Петаметр (Пм)
Тера	Т	$10^{12}$	Тераджоуль (ТДж)
Гига	Г	$10^9$	Гигаом (ГОм)
Мега	М	$10^6$	Мегаом (МОм)
Кило	К	$10^3$	километр (км)
Гекто	Г	$10^2$	гектоватт (гВт)
Дека	Да	$10^1$	декалитр (дал)
Деци	Д	$10^{-1}$	дециметр (дм)
Санتي	С	$10^{-2}$	сантиметр (см)
Милли	М	$10^{-3}$	миллиампер (мА)
Микро	мк, $\mu$ (греч. «мю»)	$10^{-6}$	микровольт (мкВ, $\mu$ В)
Нано	Н	$10^{-9}$	нанометр (нм)
Пико	П	$10^{-12}$	пикофарада (пФ)
Фемто	Ф	$10^{-15}$	фемтометр (фм)
Атто	А	$10^{-18}$	аттокулон (аКл)

**Примечание:** при произношении ударение не должно приходиться на приставку.

## Приложение 2

### Основные физические константы в СИ

Название	Символ	Значение
Гравитационная постоянная	$\gamma$	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	c	$2,99793 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	$6,022252 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	R	$8,31510 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Фарадея	F	$9,6487 \cdot 10^4 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
Постоянная Планка	h	$6,62491 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma$	$5,6607 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-4}$
Постоянная Вина	b	$2,8979 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Заряд электрона	e	$1,60021 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e$	$9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p$	$1,67261 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

## Литература

1. Белановский, А. С. Основы биофизики в ветеринарии: учебное пособие для студентов вузов по специальности «Ветеринария» / А. С. Белановский. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Дрофа, 2007. – 332 с.: ил.
2. Грабовский, Р. И. Курс физики: учебное пособие для высших сельскохозяйственных вузов / Р. И. Грабовский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 2004. – 605 с.: ил.
3. Ливенцев, Н. М. Курс физики для медвузов: учебник / Н. М. Ливенцев. – 5-е изд., переб. и доп. – Москва: Высшая школа, 1999. – 648 с.: ил.
4. Ремизов, А. Н. Курс физики, электроники и кибернетики для медицинских институтов: учебник для студентов медицинских специальностей вузов / А. Н. Ремизов. – Москва : Высшая школа, 1982. – 607 с.: ил.
5. Соболевский, В. И. Физика и биофизика: учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ / В. И. Соболевский, О. В. Пышненко. – Витебск : ВГАВМ, 2006. – 81 с: табл., рис.
6. Соболевский, В. И. Механизм электрогенеза в клетках : учебно-методическое пособие по изучению дисциплины «Физика и биофизика» для студентов вузов по специальности «Зоотехния», «Ветеринарная медицина» / В. И. Соболевский; Витебская государственная академия ветеринарной медицины, Кафедра физики и биофизики. – Витебск, 2003. – 30 с.

Учебное издание

**Толкач** Елена Владимировна,  
**Коваленок** Наталья Павловна,  
**Толкач** Алексей Николаевич

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ФИЗИКА С ОСНОВАМИ БИОФИЗИКИ»**

Рабочая тетрадь

Ответственный за выпуск Е. Л. Братушкина  
Технический редактор О. В. Луговая  
Компьютерный набор Е. В. Толкач  
Компьютерная верстка Т. А. Никитенко  
Корректор Т. А. Никитенко

Подписано в печать 29.08.2022. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 1,96. Тираж 120 экз. Заказ 2296.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Витебская ордена «Знак Почета»  
государственная академия ветеринарной медицины».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/ 362 от 13.06.2014.  
ЛП №: 02330/470 от 01.10.2014 г.  
Ул. 1-я Доватора, 7/11, 210026, г. Витебск.  
Тел.: (0212) 48-17-82.  
E-mail: rio@vsavm.by  
<http://www.vsavm.by>